INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2014 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MEDICINA
Efectos del deporte en el corazón

ASTRONOMÍA
El legado árabe

EVOLUCIÓN
Orígenes de la complejidad biológica

IDEAS QUE CAMBIAN EL MUNDO

Laboratorios virtuales

La supercomputación está revolucionando la ingeniería de materiales

LABORATORIOS VIRTUALES | EFECTOS DEL DEPORTE EN EL CORAZÓN | COMPLEJIDAD BIOLÓGICA

N.º 449

FEBRERO 2014



6,50 EUROS



SUREN MANVELYAN

ARTÍCULOS



6



88



92

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

La manera tradicional de diseñar nuevos materiales se ha basado siempre en el método de ensayo y error. Desde hace unos años, la posibilidad de simular en superordenadores las propiedades cuánticas de la materia augura una revolución en la manera de concebir y poner a prueba nuevos compuestos. Esta y otras nueve propuestas conforman nuestro informe anual «Ideas que cambian el mundo». Ilustración de André Kutscherauer.



redaccion@investigacionyciencia.es



Diciembre 2013

SEÍSMOS Y ONDAS GRAVITACIONALES

En el artículo «Cómo oír la gran explosión» [por Ross D. Andersen; Investigación y Ciencia, diciembre de 2013] se comenta la necesidad de proteger los detectores terrestres de ondas gravitacionales de los efectos provocados por las sacudidas sísmicas, incluso las más leves. ¿Qué mecanismos compensatorios se emplean para amortiguar los detectores y evitar estas y otras interferencias? ¿Podría la técnica en que se basan dichos detectores (interferometría láser) hallar aplicaciones en el estudio de las ondas sísmicas terrestres, dada su elevada sensibilidad a ellas?

Juan Torras Suriol
Tarrasa, Barcelona

Responde Alicia Sintes Olives (Grupo de Relatividad de la Universidad de las Islas Baleares y miembro de la Colaboración LIGO): *Son numerosos los factores que causan constantes y minúsculos cambios en la longitud relativa de los brazos de los interferómetros y que tienden a enmascarar las señales de las ondas gravitacionales. Los detectores como LIGO utilizan tecnología punta para minimizar los efectos de las vibraciones locales y los movimientos de la corteza terrestre, así como para contrarrestar las fuerzas de marea que el Sol, la Luna e incluso los océanos ejercen sobre los espejos del detector.*

El sistema de posicionamiento y aislamiento de LIGO funciona mediante una combinación de siete niveles activos y pasivos de aislamiento sísmico. Por «activos» nos referimos a sensores de posición y velocidad (con sismómetros en este último caso) que detectan el movimiento de la plataforma y emplean electroimanes en bucles de retroalimentación para mantenerla inmóvil. Un ejemplo son los sistemas hidráulicos situados en el exterior de los tanques de vacío. Los pasivos están compuestos por las masas de prueba suspendidas de un sistema de péndulos acoplados de al menos cuatro niveles y muelles rígidos verticales, los cuales suprimen el movimiento por encima de sus frecuencias de resonancia. Este sistema reduce en más de nueve órdenes de magnitud (por debajo de diez hercios) el movimiento normal de la tierra y el causado por pequeños temblores. Asimismo, existen mecanismos de protección alrededor de las masas de prueba para evitar que estas se muevan demasiado, como ocurre cuando sobreviene un terremoto de gran amplitud. En tales casos, solo queda esperar a que la tierra se calme para seguir con las observaciones.

Hasta el momento, el estudio de las ondas sísmicas en el campo de las ondas gravitacionales se ha centrado en entender sus efectos en el detector. Sin embargo, recientemente se ha empezado a investigar la posibilidad de utilizar la tecnología de estos detectores para contribuir a la comprensión de los seísmos. Los más comunes se producen por la ruptura de fallas geológicas, que desplazan grandes cantidades de masa y cambian la densidad en la roca que las rodea. Como consecuencia, se produce un cambio en el campo gravitatorio, el cual ha sido observado en varias ocasiones por el satélite GRACE, así como por redes de gravímetros superconductores. Sin embargo, descubrir variaciones con estos instrumentos requiere un minucioso análisis a posteriori de los datos.

La idea que ahora se plantea es utilizar las señales de los detectores de ondas gravitacionales para observar de forma instantánea cambios de gravedad debidos a los terremotos. Estas observaciones no solo proporcionarían información directa del centro del seísmo que es inaccesible a las mediciones sísmicas, sino que su incorporación a los sistemas de alerta temprana daría lugar a un aumento significativo de los tiempos de alerta en aquellos lugares del mundo donde hay un mayor riesgo de terremotos de alta magnitud, con la consiguiente oportunidad de salvar vidas humanas. Por ello, varios grupos de todos los continentes están trabajando en las mejoras técnicas necesarias para allanar el camino hacia una nueva era en la sismología.

Deseo agradecer al Sr. Torras su interés por estas investigaciones y al grupo de divulgación de la Colaboración Científica de LIGO por ayudarme a elaborar esta respuesta.

Errata corrige

En **El nuevo imperio nuclear ruso**, de Eve Conant [Investigación y Ciencia, diciembre de 2013] concurren varias imprecisiones. En la página 75 se afirma que «el pasado julio, tras rechazar las ofertas de Francia y Japón, también Finlandia se decantó por los rusos para su próxima central». Finlandia aún no ha tomado una decisión definitiva; en julio, un comité de expertos del país recomendó la opción rusa. En la página 77 se menciona que los reactores de tipo VVER «se alojan en un edificio de contención». En realidad, solo los modelos VVER recientes lo hacen. Asimismo, como apunta nuestro lector Manuel Golmayo Fernández, se afirma que los reactores que se fundieron en Chernóbil «empleaban agua a presión para generar el vapor de las turbinas»; sin embargo, aquellos reactores eran del tipo RBMK, un modelo que no pertenece a la clase de reactores de agua a presión.

En **La larga vida de los humanos**, de Heather Pringle [Investigación y Ciencia, diciembre de 2013], en la página 29 deben sustituirse las tres últimas oraciones del tercer párrafo («Finch explica... tejidos sanos.») por «El calor y el enrojecimiento se producen por la rápida afluencia de sangre caliente hacia el tejido dañado. La hinchazón se debe al aumento de la permeabilidad vascular, que hace que las células y el plasma se introduzcan en la zona afectada, donde aportan proteínas que ayudan a prevenir la propagación de la infección y a iniciar la cicatrización de la herida».

Como apunta nuestro lector Josué Casado Rebasco, en el artículo **Mundos con dos soles**, de W. F. Welsh y L. R Doyle [Investigación y Ciencia, enero de 2014], el recuadro de la página 25 menciona dos veces los «planetas de tipo S». La segunda definición se refiere en realidad a los planetas de tipo P.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

ENERGÍA

Electricidad solar a la carta

En las zonas rurales del África subsahariana solo una persona de cada seis dispone de electricidad. Las lámparas de queroseno constituyen la fuente primaria de luz de muchos hogares, pero sus usuarios pagan por ello un coste muy alto, tanto en dinero como en salud. Un aldeano de Kenia o Ruanda abona por el queroseno docenas de veces más que lo que paga un estadounidense por la electricidad necesaria para obtener el mismo alumbrado. Cargar un teléfono móvil en un quiosco resulta aún más caro. «No es que los más pobres del mundo paguen un poco más por la energía, sino que desembolsan una cantidad desproporcionada», sostiene Simon Bransfield-Garth, director de Azuri Technologies, una empresa de energía solar radicada en el Cambridge británico. Además, las lámparas de queroseno contaminan el aire, por lo que entrañan riesgos para la salud, sobre todo la de los niños.

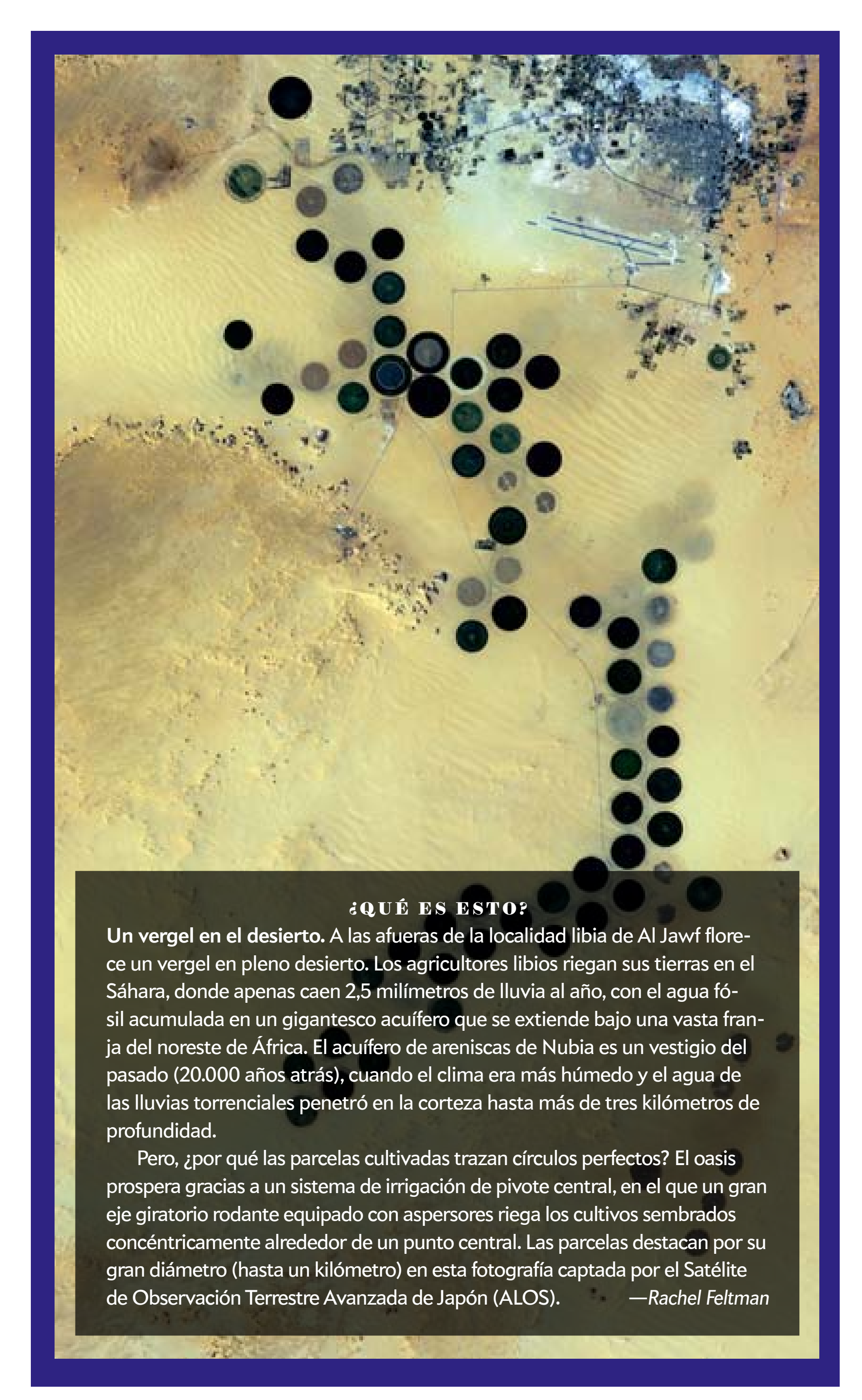
Los juegos de componentes solares para alumbrar y cargar baterías ofrecen una alternativa prometedora. Sin embargo, muchas familias rurales no pueden adelantar los 40 euros o más que requiere la inversión. Por eso, Azuri y otros fabricantes venden sus productos con un plan de financiación que reduce el desembolso inicial a menos de 10 euros. Después, las familias pagan por la electricidad a medida que la van usando o bien cuando pueden (tras una buena cosecha, por ejemplo). Una vez amortizado el kit solar, la electricidad subsiguiente es gratuita.

Parece que la idea va cobrando fuerza. Azuri cuenta ya con más de 21.000 clientes. M-KOPA Solar, que emplea la red de pagos por teléfono móvil M-PESA, muy extendida en algunos países del continente, sirve a 40.000 hogares. Y Angaza-Design, radicada en Estados Unidos, va camino de llegar a los 10.000 clientes en un año.

Pero llevar la técnica a muchos hogares más quizá resulte difícil. Algunas de las nuevas empresas que han comenzado a prestar el servicio se están acercando a sus límites de capital mientras esperan el reembolso por parte de sus clientes. Y, si estos dejan de pagar, los problemas de liquidez solo empeoran aún más.

Con todo, el lanzamiento de servicios semejantes podría traer importantes lecciones para el resto del mundo. «Se debate sin cesar sobre cuándo se equiparará el coste de la energía solar con el de la electricidad de la red, ya sea en Estados Unidos o en cualquier otra parte», recuerda Bryan Silverthorn, jefe técnico de Angaza. «África es un lugar donde, para una gran parte de la población, la energía solar es hoy la más barata. Quién sabe qué pasará a continuación.»

—David Wagan



¿QUÉ ES ESTO?

Un vergel en el desierto. A las afueras de la localidad libia de Al Jawf florece un vergel en pleno desierto. Los agricultores libios riegan sus tierras en el Sáhara, donde apenas caen 2,5 milímetros de lluvia al año, con el agua fósil acumulada en un gigantesco acuífero que se extiende bajo una vasta franja del noreste de África. El acuífero de areniscas de Nubia es un vestigio del pasado (20.000 años atrás), cuando el clima era más húmedo y el agua de las lluvias torrenciales penetró en la corteza hasta más de tres kilómetros de profundidad.

Pero, ¿por qué las parcelas cultivadas trazan círculos perfectos? El oasis prospera gracias a un sistema de irrigación de pivote central, en el que un gran eje giratorio rodante equipado con aspersores riega los cultivos sembrados concéntricamente alrededor de un punto central. Las parcelas destacan por su gran diámetro (hasta un kilómetro) en esta fotografía captada por el Satélite de Observación Terrestre Avanzada de Japón (ALOS). *—Rachel Feltman*

GETTY IMAGES (*cielo*); CORTESÍA DE LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (*desierto*)

GEOLOGÍA

Las mejores piedras para el curling



Cuando el día 7 de este mes comiencen los Juegos Olímpicos de Invierno en Sochi, veremos a esquiadores descender pendientes a 130 kilómetros por hora, jugadores de hockey arrojarse con ímpetu contra las vallas y practicantes de tabla sobre nieve contornearse y ejecutar múltiples vueltas por salto. Sin embargo, podremos disfrutar también de un deporte más tranquilo: el curling. Semejante a unos «bolos sobre hielo», sus participantes deben lanzar una piedra de unos 20 kilos a lo largo de una superficie congelada. Mientras, sus compañeros cepillarán el suelo a fin de modificar el efecto giratorio (*curl*) que el lanzador impartió inicialmente a la piedra y, de esta manera, intentar que esta se acerque lo máximo posible a un blanco.

Aunque recién llegado a los Juegos Olímpicos (en 1998), el curling cuenta con una larga y rica historia. «Absolutamente todas las piedras del curling olímpico proceden de una pequeña isla escocesa: Ailsa Craig», explica Erika Brown, capitana del equipo femenino de Estados Unidos. «No existen piedras que giren como las de Ailsa Craig.»

La isla, situada a unos quince kilómetros de la costa escocesa, ocupa unas 90 hectáreas. De ella salen las dos variedades de granito que se usan en las competiciones de élite. La capa que se desliza sobre el hielo se fabrica con cierta variedad azul; la central, o capa de golpeo, con granito verde común. «El revestimiento de piedra que avanza sobre el hielo ni se astilla ni absorbe agua; pero, sobre todo, su comportamiento resulta muy predecible. Siempre sabes qué va a pasar con el lanzamiento», asegura Brown. «Además, la capa central no se rompe cuando las piedras chocan.»

Ese comportamiento puede explicarse a partir de la historia geológica de la isla, formada hace 60 millones de años. Ailsa Craig es una intrusión volcánica. Como explica John Faithfull, geólogo de la Universidad de Glasgow, se trata de una masa de magma que se abrió paso entre las formaciones preexistentes. El magma se enfrió con rapidez y formó granito, mientras que la roca circundante se erosionó. Faithfull aclara que, al final, lo único que sobrevivió fue la roca que hoy forma Ailsa Craig, muy dura y resistente.

A medida que cristalizaba, la roca volcánica desarrolló una superficie robusta y uniforme. «Cuando el magma se enfría tan rápido, se forman cristales muy pequeños. Estos se entrelazaron y surgieron enlaces químicos entre ellos», apunta Martin Gillespie, del Servicio Geológico Británico. «Y tampoco parece que tenga microgrietas», concluye.

Las cualidades únicas de ese granito lo convierten en un «patrón oro», asegura Brown. «Para quienes practicamos el curling, la isla es un lugar místico.»

—Michael Easter

BIOLOGÍA

Setas mágicas

Las setas han sido descritas en ocasiones como órganos rudimentarios que se limitan a engendrar tantas esporas como pueden. La distancia recorrida quedaría al arbitrio del viento. Sin embargo, una mirada más atenta ha revelado un panorama más complejo.

Marcus Roper, matemático de la Universidad de California en Los Ángeles, asegura que las setas representan la materia oscura de la biología. Se hallan por todas partes, pero han sido muy poco estudiadas.

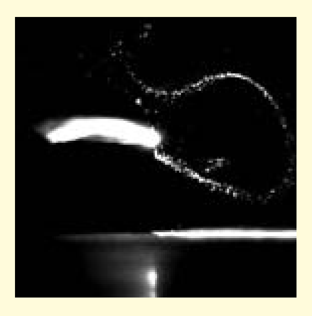
Roper y sus colaboradores han empleado técnicas de grabación en vídeo de alta velocidad y análisis matemáticos para investigar la dispersión de las esporas en ausencia de viento. En un reciente encuentro de la sección de dinámica de fluidos de la Sociedad Estadounidense de Física anunciaron, para sorpresa de todos, que los hongos creaban sus propias corrientes de aire.

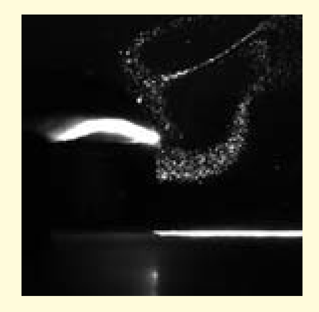
El truco para lanzar al aire las esporas se denomina enfriamiento por evaporación. La evaporación de minúsculas gotas de agua que aparecen en la superficie del hongo justo antes de la dispersión genera el vapor necesario para elevar las esporas y facilitar su diseminación.

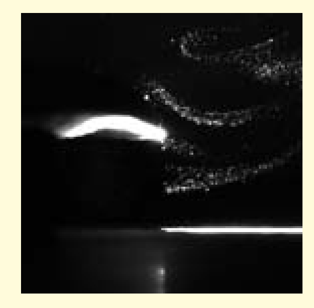
El nuevo descubrimiento «ahonda en las complejidades que ocultan las humildes setas», afirma Nicholas Money, biólogo de la Universidad de Miami en Ohio. «Es un ejemplo espléndido de ingeniería evolutiva.»

—Rachel Nuwer









RYAN McVAY, GETTY IMAGES (*piedra de curling*); CORTESÍA DE EMILIE DRESSAIRE, TRINITY COLLEGE Y MARCUS ROPER, UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA EN LOS ÁNGELES (*setas*)

CONSERVACIÓN

Marfil reducido a polvo

Una despejada mañana del pasado noviembre, el aire de las afueras de Denver se llenó de polvo cuando una machacadora de roca pulverizó casi seis toneladas de marfil de elefante. Los volquetes vertieron en la trituradora un lote tras otro de colmillos enteros, estatuillas talladas, brazaletes y otros abalorios, que salieron convertidos de las entrañas de la máquina en fragmentos similares a pedazos de conchas.



El Servicio de Pesca y Fauna Silvestre de EE.UU. destruyó esa jornada los alijos de marfil incautados a lo largo de un cuarto de siglo (con un valor estimado de 12 millones de dólares en el mercado negro) para lanzar un claro mensaje a todo el mundo: el país no tolerará la caza furtiva de los elefantes ni los delitos contra la fauna en general. El comercio internacional de marfil es ilegal desde 1989, pero hoy los cazadores furtivos siguen abatiendo elefantes africanos por sus colmillos, a razón de uno cada 15 minutos. De seguir así, la especie se extinguirá en pocas décadas.

A las autoridades no solo les preocupa el volumen del comercio de marfil, sino a costa de qué animales se lucra. Hoy la caza furtiva está dirigida por organizaciones criminales internacionales que trafican con la fauna del mismo modo que con personas, drogas o armas. Los dividendos que reporta la venta ilegal de marfil, cuernos de rinoceronte y otros productos faunísticos (cifrados en 19.000 millones de dólares anuales) financian a grupos terroristas y otros colectivos extremistas. Y los países que albergan elefantes salvajes no suelen disponer de los recursos necesarios para perseguir a los delincuentes.

La destrucción del marfil decomisado sigue siendo objeto de controversia porque hay quien pone en duda que ayude a acabar con el tráfico. Los críticos sostienen que ese tipo de acciones que reducen las existencias de marfil impulsan el precio al alza y fomentan aún más la caza furtiva.

Pero los intentos por inundar el mercado con marfil han causado el efecto contrario y han alentado la caza ilegal, asegura Peter Knights, de WildAid, una organización no gubernamental de San Francisco. Knights equipara el tráfico ilegal de fauna silvestre con el narcotráfico y cree preciso mirar al pasado y aprender una lección: «A nadie se le ocurriría volver a poner en circulación la heroína aprehendida».

—Kate Wong

Los gastos de desplazamiento de la autora para asistir a la destrucción del marfil fueron sufragados en parte por la Fundación Internacional para el Bienestar Animal (IFAW) y el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF).

ZOOLOGÍA

Ayunar para comer y no ser comido

Los pájaros que revolotean en invierno por los jardines tienen una sola preocupación: encontrar alimento para subsistir y poder engendrar la descendencia en la próxima primavera y verano. Un ave menuda llega a perder hasta el diez por ciento de su peso en una sola noche, por lo que se ve obligada a comer sustanciosamente a diario. Sin embargo, si se excede puede perder agilidad y ser presa fácil de gavilanes y otros depredadores.

Investigadores de la Universidad de Oxford fijaron microchips a más de 2000 pájaros con el propósito de seguir sus movimientos. Por medio de una red de comederos equipados con detectores de microchips y el traslado diario de algunos de estos comederos dedujeron cómo buscaban el sustento.

Cuando las aves abandonan los dormideros por la mañana, exploran el entorno y evalúan la calidad y la ubicación de las fuentes de alimento sin probar bocado. Este ayuno matinal les permite conservar la agilidad indispensable para burlar a sus enemigos durante las horas diurnas. Al caer la tarde, regresan a los lugares donde saben que hallarán alimento, según describen los autores del estudio en *Biology Letters*.

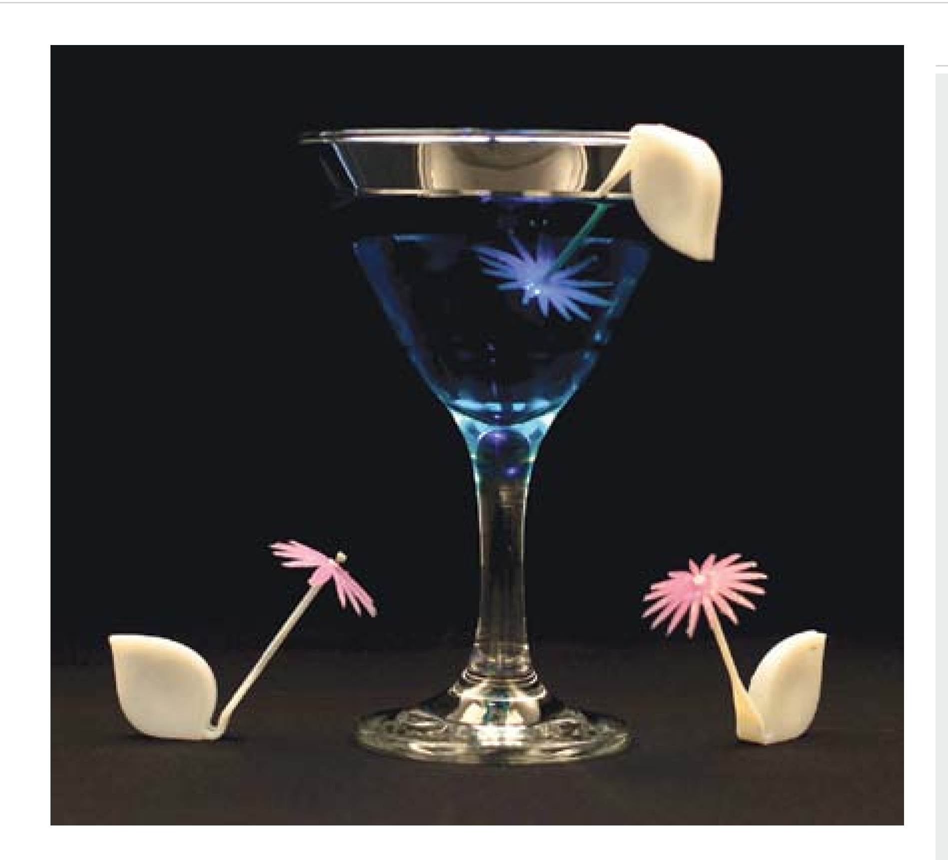


Este nuevo experimento supone uno de los primeros intentos por estudiar cómo resuelven los pájaros silvestres el dilema de comer sin convertirse en un bocado apetecible. «Casi todos los trabajos precedentes se basaban en modelos teóricos o se habían llevado a cabo en cautividad», asegura Damien Farine, coordinador del experimento.

Sistemas similares de implantación de microchips permitirán investigar otras cuestiones relativas a la trasmisión de enfermedades, la estructura de las redes sociales y las capacidades cognitivas de las aves, afirma Ron Ydenberg, director del Centro de Ecología Silvestre de la Universidad Simon Fraser, en la Columbia Británica. «Cuando me gradué, hace treinta años, este tipo de análisis parecían irrealizables», recuerda.

—Jason G. Goldman

ED ANDRIESKI, AP PHOTO (*marfil*); YOKU MISHIMA, CORBIS (*pájaro*)



INGENIERÍA

Micromáquinas en el cóctel

No parece que encontrar un insecto en la bebida vaya a agradar a nadie. Sin embargo, un célebre cocinero y un equipo del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) esperan que un imaginativo accesorio para cócteles inspirado en un insecto acuático provoque la delicia de los comensales.

El diminuto artilugio, cuya forma recuerda a una barca, se propulsa por la superficie de la bebida durante unos dos minutos gracias a un truco sacado de la naturaleza. La pequeña barca contiene un licor de alta gradación que se va derramando poco a poco en el cóctel a través de una muesca abierta en un extremo. La diferencia en contenido alcohólico entre los dos líquidos crea un gradiente en la tensión superficial que impulsa la barca mediante el efecto Marangoni. Numerosos insectos acuáticos se basan en el mismo fenómeno para propulsarse; pero, en vez de verter Bacardi 151, desprenden sustancias que modifican la tensión superficial bajo sus patas.

El origen del aparato se remonta al día en que John Bush, profesor de matemática aplicada en el MIT, asistió a una charla del chef José Andrés, que imparte clases de ciencia culinaria en Harvard. Bush le sugirió que colaborasen. «Buena parte de mis investigaciones versan sobre la tensión superficial, que a su vez es la causa de todo tipo de fenómenos interesantes en la cocina... o en el bar», explica.

Aparte del ingenio mencionado, los investigadores diseñaron una pipeta con forma de flor que el comensal puede sumergir en el cóctel para después llevarse una gota a la lengua. La pipeta cierra sus pétalos cuando es extraída del líquido y atrapa así una gota en su interior. El artilugio imita a la inversa el mecanismo de las flores flotantes que, como los nenúfares, se cierran para atrapar aire cuando sube el nivel del agua. El pasado mes de octubre, Bush, Andrés y otros colaboradores publicaron sus resultados en la revista *Bioinspiration & Biomimetics*.

Para lograr su objetivo, los investigadores emplearon primero una impresora en 3D para fabricar los prototipos. Después, confeccionaron moldes para que Andrés y su equipo hiciesen las barcas y las flores con gelatina o caramelo. «Los diseños no solo tienen que ser funcionales y estéticamente agradables, sino también comestibles», añade Bush.

—*Rachel Feltman*

CREDIT TKTK (*micromáquina*); PAL ROBOTICS (*robot*)

AGENDA

CONFERENCIAS

13 de febrero
Grandes instrumentos para un mundo minúsculo: Los aceleradores y protectores de partículas del CERN
Ciclo «Los secretos de las partículas. La física fundamental en la vida cotidiana»
Mar Capeáns, CERN
Fundación BBVA
Madrid
www.fbbva.es > Agenda

19 de febrero
Avances en cáncer de mama: De la biología tumoral a la cabecera de la paciente. Una perspectiva integral
César A. Rodríguez Sánchez, Hospital Universitario de Salamanca
Proyecto Ciudad Ciencia
Miranda de Ebro
www.ciudadciencia.es

EXPOSICIONES

A partir del 4 de febrero
Las moléculas de la vida
Casa de la Ciencia
Sevilla
www.casadelaciencia.csic.es

Hasta el 23 de febrero
La superación de un matemático. Ferran Sunyer i Balaguer
Palacio Robert, Barcelona
Gencat.cat/palaurobert

Experiencias matemáticas
Museo de Matemáticas de Cataluña
Cornellá de Llobregat
www.mmaca.cat

OTROS

6 de febrero - Demostración
Robots humanoides en el mundo real
Jordi Albó Canals, La Salle
Barcelona - URL
Cosmocaixa
Barcelona
Cosmocaixa.com



Curso para educadores
Universo Internet
Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
Barcelona
www.cccbeducacio.org

GENÉTICA DE POBLACIONES

La historia evolutiva del pueblo asturiano

Las antiguas fronteras entre asentamientos astures han dejado su rastro en el ADN de los habitantes actuales

Los análisis de la diversidad genética de los grupos humanos permiten determinar cuál es su origen y rastrear posibles movimientos migratorios que tuvieron lugar en el pasado. Estas observaciones constituyen un soporte importante para los estudios forenses y médicos que, como en los casos de criminalidad y las pruebas de paternidad, necesitan conocer la composición genética de las poblaciones sondeadas.

Actualmente, los análisis de los grandes grupos continentales clásicos (europeos, asiáticos, africanos y nativos americanos) han dejado paso a investigaciones regionales, dado el progresivo avance y abaratamiento de las técnicas de secuenciación del ADN. Eventos destacables en la historia, como la colonización de la Polinesia, el nacimiento de la etnia romaní o el repoblamiento magdaleniense de Europa occidental, por mencionar algunos ejemplos, se estudian gracias al esfuerzo de numerosos grupos que trabajan a escala local. Cada nuevo hallazgo surgido de la labor de estos equipos arroja luz sobre el pasado y el presente de la humanidad, y permite avanzar en el campo de la antropología física.

Diversidad genética en Asturias

En el noroeste de la península ibérica se encuentra Asturias, una comunidad autónoma con alrededor de un millón de habitantes, cuyas características y geografía la hacen especialmente interesante para ese tipo de trabajos. Aislada de la meseta Central por la cordillera Cantábrica, sus ríos cortos y caudalosos, que desembocan en el mar Cantábrico, trazan profundos valles separados por montañas que dibujan una orografía intrincada.



EL MUESTREO GENÉTICO se realizó sobre individuos con ascendencia asturiana de al menos dos generaciones, cubriendo la mayor parte del territorio regional. En la imagen, fiesta popular celebrada a principios del siglo XX cerca de Oviedo.

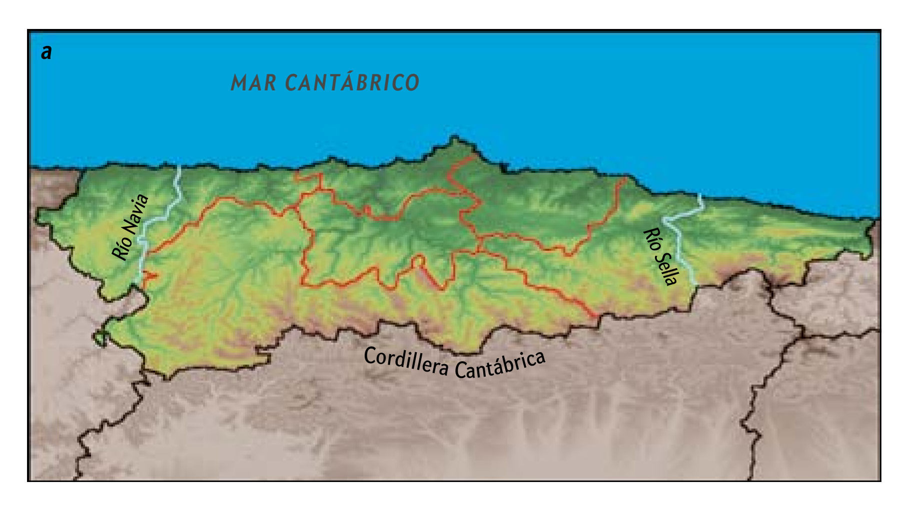
Los pequeños y numerosos núcleos poblacionales que salpican esos valles han permanecido aislados unos de otros durante largo tiempo (sobre todo en el pasado). Ello ha permitido que se conservaran en el ADN de los asturianos huellas genéticas de épocas remotas, a pesar de la gran movilidad de las poblaciones humanas actuales.

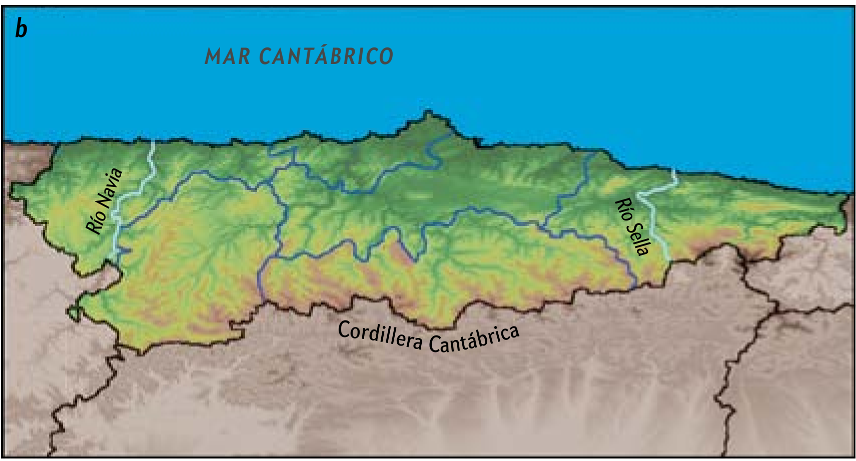
En el año 2009, los investigadores firmantes de este artículo, junto con Eva García y Agustín Roca, del área de genética de la Universidad de Oviedo, iniciaron un proyecto para analizar la diversidad genética de Asturias. Durante dos años, y gracias a la colaboración de ayuntamientos, medios de comunicación y, especialmente, de voluntarios desinteresados, se obtuvo una muestra del ADN de más de 500 asturianos cuyos municipios de nacimiento abarcaban el 80 por ciento del territorio. Estos participantes fueron elegidos por contar con antepasados asturianos en las dos generaciones anteriores como mínimo, lo que aseguraba un cierto grado de autoctonía. Los resultados del estudio se publicaron en las revistas *Journal of Human Genetics* y *PLoS ONE* en 2012.

Linajes privados

La secuenciación del ADN mitocondrial (heredado por vía materna) de estos voluntarios permitió encontrar linajes que no eran compartidos con otras poblaciones peninsulares. La distribución de estos linajes privados asturianos, comparada con hallazgos semejantes en otras regiones europeas, puede considerarse consecuencia del aislamiento histórico, o bien de una fragmentación interna de la población, es decir, de una estructuración genética (una población estructurada genéticamente es aquella compuesta por subunidades o subpoblaciones menores, con diferencias genéticas entre las mismas).

Un análisis detallado, en el que se consideró la procedencia geográfica de cada muestra, reveló la existencia de una marcada estructuración genética





EL ANÁLISIS DEL ADN DE MÁS DE 500 VOLUNTARIOS ha arrojado luz sobre la composición genética del pueblo asturiano. Las líneas negras marcan los límites administrativos provinciales. Las de colores, que corresponden a «saltos» en la frecuencia de los linajes maternos y paternos hallados en la zona, definen la estructura genética de las subpoblaciones. Se observa una gran concordancia entre los resultados obtenidos a partir del análisis del ADN mitocondrial (*a*, *rojo*) y los del cromosoma Y (*b*, *azul*).

FUENTE: «ASSESSING THE GENETIC INFLUENCE OF ANCIENT SOCIOPOLITICAL STRUCTURE: MICRO-DIFFERENTIATION PATTERNS IN THE POPULATION OF ASTURIAS (NORTHERN SPAIN)», POR ANTONIO FERNÁNDEZ PARDIÑAS ET AL. EN *PLOS ONE*, VOL. 7, NÚM. 11, E50206, 2012.

en Asturias. Esta afecta sobre todo a los municipios de los extremos oriental y occidental de la región, cuyas poblaciones muestran una diferenciación genética con respecto a las centrales. Este tipo de estructuración espacial es bastante común en otras especies animales, pero resulta infrecuente en los humanos, en los que puede aparecer a consecuencia de factores históricos, barreras geográficas naturales o ambos.

Para confirmar esos resultados, se realizaron los mismos análisis sobre el cromosoma Y (de herencia paterna) de la muestra asturiana. Se encontró una concordancia casi total entre ambos marcadores genéticos (ADN mitocondrial y cromosoma Y). Ello sugiere un origen antiguo de las subpoblaciones asturianas, basado en agrupaciones de tipo familiar relativamente aisladas entre sí y con movilidad (migración) similar para ambos sexos.

Barreras sociopolíticas

En escalas espaciales reducidas, se esperaría que la diferenciación genética de las poblaciones humanas fuera proporcional a la distancia geográfica que las separa. Sin embargo, en ocasiones esta hipótesis no se cumple. Ello se debe a la existencia de barreras genéticas, es decir, obstáculos que dificultan la migración y, con ello, el flujo génico entre poblaciones, causando una división entre las mismas. Este es el caso de la población asturiana.

Mediante la aplicación de métodos más refinados, que permiten detectar obstáculos a las migraciones, descubrimos que los municipios del sur, los más cercanos a la cordillera Cantábrica y de relieve más montañoso, mostraban diferenciaciones genéticas con respecto a sus vecinos muy superiores a las que cabría esperar por su separación geográfica. Asimismo, hallamos que las divisiones más marcadas (las que indicaban una mayor diferencia en las frecuencias génicas de ADN mitocondrial y cromosoma Y) coincidían con los extremos orientales y occidentales de esos municipios.

¿Cuáles habrían podido ser los obstáculos causantes de esas diferenciaciones? ¿Dónde se situarían? Cabe resaltar que, debido al propio método de análisis, cuya unidad de muestreo ha sido el municipio, la localización de las barreras genéticas solo puede estimarse en el plano administrativo actual, no en el geográfico.

Para averiguar dónde se hallarían las barreras «reales», debemos buscar en los accidentes geográficos más próximos: en este caso, los ríos Sella y Navia. Con todo, dado que no constituyen obstáculos infranqueables, parece poco razonable pensar que hubieran significado una barrera natural para los habitantes de la zona. Sin embargo, y puesto que estos ríos servían de fronteras entre las antiguas tribus astures que poblaban la zona en la época prerromana, más bien habrían operado a modo de barrera sociopolítica.

Asociaciones similares entre las fronteras prerromanas y la diferenciación genética poblacional también se han encontrado en otras zonas del norte peninsular, como en el País Vasco, según un reciente estudio llevado a cabo por el Consorcio Internacional Genographic. Ello sugiere que las características del poblamiento ibérico durante la Edad Antigua, junto con las políticas territoriales prerromanas y romanas, han dejado huellas en el ADN de las poblaciones humanas que han llegado hasta nuestros días.

Se abren nuevos interrogantes tanto hacia atrás como hacia delante en la historia: ¿cuál es la huella de las migraciones medievales y modernas? ¿Qué mezcla ancestral de linajes genéticos generó las poblaciones autóctonas de la cornisa Cantábrica? Continuamos investigando.

—Belén López Martínez
—Antonio Fernández Pardiñas
Área de antropología física
Universidad de Oviedo

QUÍMICA

La versatilidad de los fullerenos

La encapsulación de metales en el interior de estas moléculas y la funcionalización de las mismas abren nuevas vías de aplicación en biomedicina y nanotecnología

Un balón de fútbol consta de 12 pentágonos y 20 hexágonos de cuero, y tiene un diámetro de unos 22 centímetros. Si sustituimos cada uno de los vértices de los pentágonos y hexágonos del balón imaginario por un átomo de carbono, y reducimos su tamaño a unas tres cienmillonésimas partes, hablamos entonces de un fullereno: en concreto, el C_{60}. Fue descubierto en 1985 por Richard F. Smalley, Harold Kroto y Robert F. Curl [*véase* «Fullerenos», por Robert F. Curl y Richard F. Smalley; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1991], lo que les valió el premio Nobel de química en 1996.

Además de ser el primero en conocerse, el C_{60} es el fullereno más abundante. Desde su hallazgo, se han sintetizado otras moléculas del mismo tipo (C_{70}, C_{76}, C_{80}, C_{82}, C_{84}, etcétera); contienen todas 12 pentágonos de carbono y un número de hexágonos que varía según el tamaño del «balón». Dado que estos pentágonos y hexágonos pueden ordenarse de múltiples formas, a cada fullereno le corresponde un gran numero de isómeros (31.924 en el caso del C_{80}); sin embargo, habitualmente se forman y detectan solo uno o dos. Los fullerenos se hallan presentes en el hollín y en las nubes de polvo cósmico, como productos de las altas presiones y temperaturas.

Endoédricos y funcionalizados

Si bien poseen propiedades fisicoquímicas interesantes (como una gran afinidad electrónica), los fullerenos en sí tienen pocas aplicaciones prácticas. Ahora bien: modificados, adquieren propiedades moleculares que abren nuevas vías de aplicación en el campo de la biomedicina y la nanotecnología.

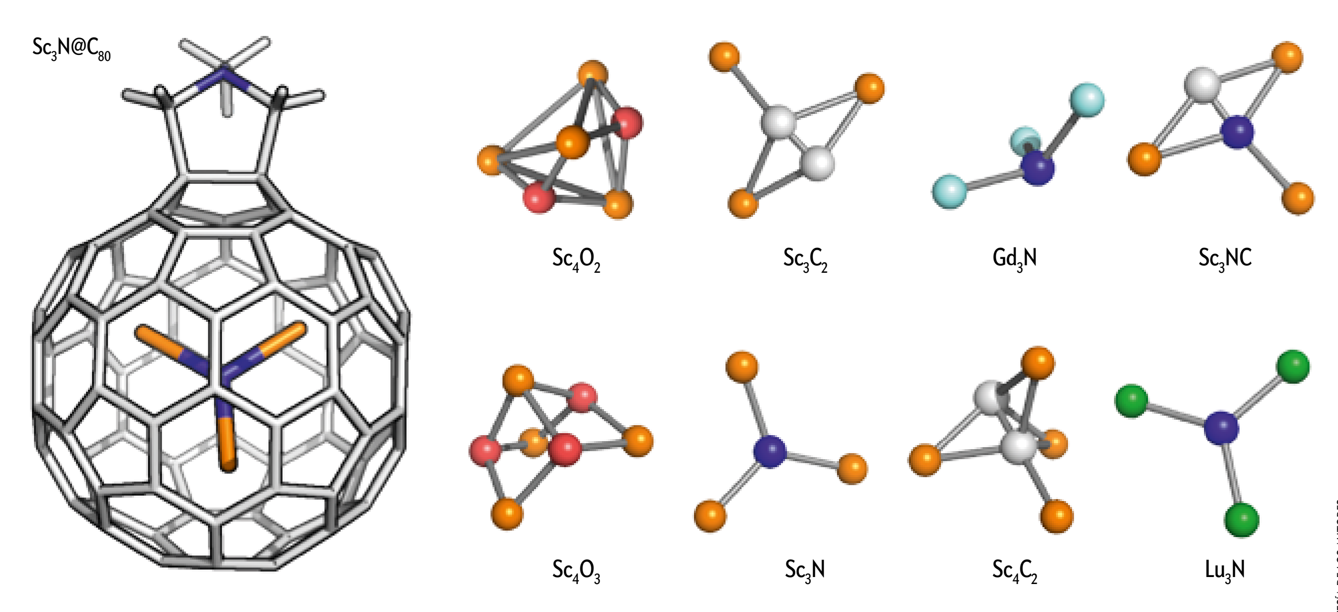
Los fullerenos pueden modificarse de dos maneras. Por un lado, mediante la inclusión de un átomo o molécula en el interior de la caja de carbono; se obtiene así un fullereno endoédrico, o endofullereno. Por otro, a través de la reacción con agentes externos, con lo que se obtiene un fullereno funcionalizado. Cuando se combinan las dos opciones, hablamos de un endofullereno funcionalizado.

Un método que suele utilizarse para producir fullerenos consiste en enviar una gran cantidad de corriente eléctrica entre dos electrodos de grafito cercanos bajo una atmósfera inerte. El arco de plasma de carbono que se forma entre los electrodos se enfría, generando residuos de hollín que contienen fullerenos.

Para obtener fullerenos endoédricos, se introducen en los electrodos de grafito óxidos, sulfuros o nitruros de metales. Según el material incorporado, se forman diferentes tipos de moléculas. Una de las más abundantes es el $Sc_3N@C_{80}$, donde el símbolo @ indica que el Sc_3N se aloja en el interior de la caja del fullereno C_{80}. También pueden obtenerse por cirugía molecular: mediante una serie de reacciones químicas se abre un agujero en la superficie del fullereno; se introduce luego una molécula en su interior y, finalmente, se procede a la sutura de la caja fullerénica a través de reacciones que permiten recuperar su estructura inicial. De esta forma se han introducido en fullerenos moléculas de tamaño reducido como H_2, CO, H_2O, NH_3 o CH_4.

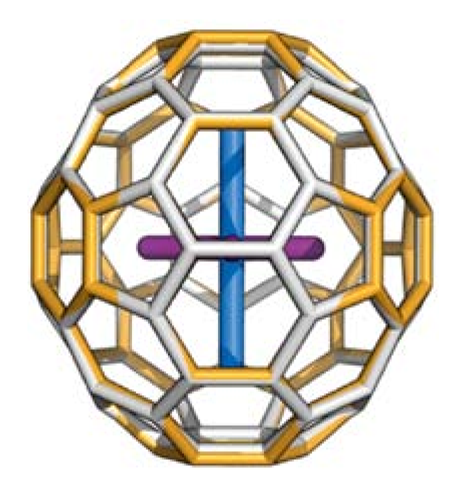
Estabilidad y reactividad

La presencia de moléculas o agregados (*clusters*) metálicos en el interior de la caja de carbono modifica de forma notable las propiedades fisicoquímicas y la reactividad del fullereno. Por ejemplo, el hecho de encapsular una unidad de Sc_3N dentro del



ILUSTRACIONES CORTESÍA DE LOS AUTORES

UNO DE LOS ENDOFULLERENOS más abundantes y fáciles de formar es el $Sc_3N@C_{80}$: una caja de 80 átomos de carbono con una unidad del agregado metálico Sc_3N en su interior. La ilustración muestra un $Sc_3N@C_{80}$ con simetría icosahédrica, funcionalizado mediante una reacción de cicloadición (*izquierda*). Asimismo, se han detectado otros agregados metálicos (*derecha*) encapsulados dentro del C_{80}.



SUPERPOSICIÓN de los endofullerenos $Sc_3N@C_{78}$ (fullereno en blanco y agregado metálico en morado) y $Ti_2C_2@C_{78}$ (fullereno en amarillo y agregado metálico en azul). La disposición de ambos agregados es totalmente opuesta. Ello modifica ligeramente el esqueleto de carbono de la caja debido a las tensiones provocadas, lo que repercute en un cambio de las zonas más reactivas y propensas a ser funcionalizadas.

C_{80} provoca que este se estabilice y forme un isómero del C_{80} con simetría icosaédrica, que, de otra manera (fullereno vacío), no se formaría nunca.

En nuestro grupo de investigación hemos aplicado las herramientas de la química computacional para estudiar la estructura y la reactividad de los fullerenos libres y endoédricos. En un trabajo publicado en junio de 2012 en *Chemistry: A European Journal*, demostramos que, en función del tipo de agregado metálico y de su orientación en el interior de la caja de carbono, se puede disminuir o aumentar la reactividad de los enlaces de la caja, así como dirigir esta reactividad de una zona del fullereno a otra.

Asimismo, en fecha más reciente hemos comprobado que la aromaticidad de los fullerenos endoédricos determina la estructura de la caja fullérenica y su reactividad frente a determinados agentes reactivos como dienos, 1-3-dipolos o carbenos. (La aromaticidad es una propiedad que poseen determinadas moléculas cíclicas y altamente simétricas que presentan una importante deslocalización electrónica, lo que las convierte en estructuras particularmente estables y poco reactivas.) Este estudio, publicado en agosto de 2013 en *Angewandte Chemie International Edition* (la revista de la Sociedad Alemana de Química), demuestra que la estabilización que experimenta un fullereno cuando encapsula un agregado metálico se debe al aumento de la aromaticidad.

Los fullerenos pueden reaccionar con ciertas moléculas que atacan su superficie exterior, formando enlaces con los átomos de carbono de la caja. De hecho, la reactividad exterior (exoédrica) de los endofullerenos es muy rica y variada, siendo las reacciones de cicloadición las más utilizadas para la obtención de endofullerenos funcionalizados. Según nuestros cálculos, la reacción de cicloadición en que se forma un anillo de ciclopropano (3 átomos de carbono) sobre la superficie de los endofullerenos se produce sobre la posición de la caja de carbono que da lugar al producto más aromático.

La aromaticidad desempeña, por tanto, un papel clave en la reactividad de los fullerenos y en la estabilización que estos sufren al encapsular agregados metálicos.

Aplicaciones

Las propiedades de los fullerenos varían completamente cuando estos se encuentran funcionalizados o contienen átomos o moléculas en su interior; ello permite diseñar y obtener fullerenos con propiedades específicas para poder ser utilizados en campos tan variados como la obtención de energía, el magnetismo, la superconductividad, la óptica no lineal o la medicina, entre otros.

Endofullerenos funcionalizados como aceptores de electrones (lo que les confiere una gran capacidad de separación de carga) se han usado en células fotovoltaicas para captar la energía procedente del Sol. Se ha sugerido incluso que alguno de estos compuestos podría ser utilizado en los futuros ordenadores cuánticos o en el desarrollo de técnicas espintrónicas. Las propiedades optoelectrónicas de estas moléculas también las hacen útiles para el diseño de interruptores moleculares. Asimismo, algunos de estos endofullerenos son superconductores, aunque por ahora solo a temperaturas muy bajas.

También en el campo de la medicina estas moléculas han encontrado numerosas aplicaciones: se han utilizado fullerenos funcionalizados como fármacos contra el sida (interfieren con el sitio activo de la proteasa del VIH-1, enzima esencial para la replicación del virus) y también como antibióticos para tratar bacterias resistentes a los fármacos más habituales. Otros han demostrado su actividad antioxidante y su capacidad para degradar los radicales superóxido que se generan

de forma natural en los organismos vivos y que se asocian al envejecimiento (el electrón libre del radical se transfiere al fullereno). Finalmente, se han utilizado fullerenos endoédricos funcionalizados como agentes de contraste para la obtención de imágenes por resonancia magnética nuclear. El gadolinio (Gd) actúa como un excelente agente de contraste, pero es tóxico. Sin embargo, cuando un átomo de Gd se encapsula dentro de una caja de carbono, generando un endofullereno, mantiene su actividad de contraste, pero, al quedar aislado del entorno, ya no resulta nocivo.

El estudio de la funcionalización de los endofullerenos reviste suma importancia para la síntesis de nuevos materiales con propiedades diseñadas y optimizadas para una función determinada. Se trata de un campo de investigación muy activo que cosechará grandes avances técnicos en los próximos años.

—Marc Garcia Borràs, Sílvia Osuna y Miquel Solà
Dpto. de química
Instituto de Química Computacional y Catálisis
Universidad de Gerona

INNOVACIÓN

Los metamateriales se acercan al mercado

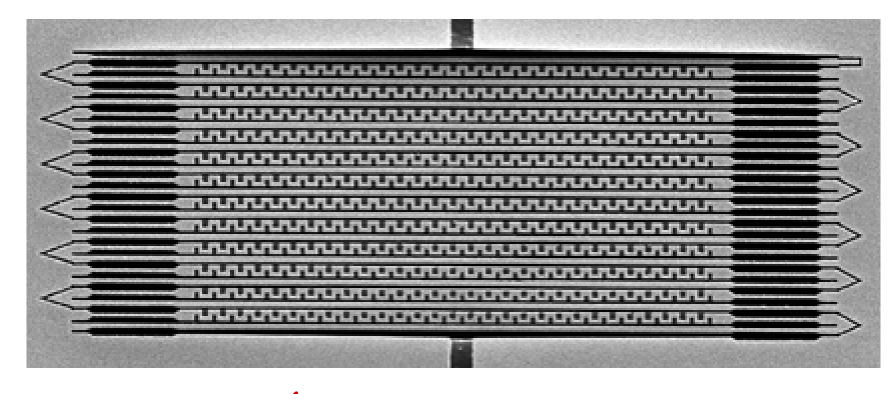
Estructuras de diseño con extrañas propiedades ópticas pronto abandonarán el laboratorio para comercializarse

Tom Discroll estaría feliz si nunca volviese a escuchar la frase «una capa de invisibilidad al estilo de Harry Potter». Pero sabe que eso no sucederá. Los medios de comunicación parecen no resistirse a usarla cuando informan sobre los últimos avances en metamateriales, conjuntos de minúsculos «elementos» que desvían, dispersan, transmiten o cambian de forma la radiación electromagnética en modos que no puede hacerlo un material natural.

Es cierto que, en principio, los metamateriales podrían dirigir la luz alrededor de los objetos y tornarlos invisibles, de forma similar a lo que haría la capa de un determinado mago de ficción. Y numerosos investigadores de metamateriales están intentando hacer realidad ese ocultamiento, entre otros motivos porque las fuerzas armadas han subvencionado con entusiasmo el desarrollo de estas capacidades. Sin embargo, para que estas aplicaciones lleguen a desarrollarse —si es que se consigue algún día— deberán transcurrir aún varios decenios.

Otras tecnologías que se hallan más cerca del mercado resultan más interesantes para Discroll, supervisor de la comercialización de metamateriales en Intellectual Ventures, una empresa de compra de patentes con sede en Bellevue, Washington. En su opinión, aplicaciones como el tratamiento óptico ultrarrápido de datos, las comunicaciones por satélite y los teléfonos móviles inteligentes de menor espesor son aquellas donde los metamateriales están destinados a tener un gran impacto.

Los investigadores aún se enfrentan a desafíos descomunales, como el de hallar formas baratas de fabricar y manipular elementos metamateriales a escala nanométrica. No obstante, se espera que los primeros productos basados en metamateriales lleguen al mercado durante los próximos meses. Driscoll confía en que poco después los consumidores comiencen a disfrutar de sus beneficios, como una conexión a Internet más rápida y barata a bordo de aviones y desde teléfonos móviles.



METAMATERIAL FOTÓNICO eléctricamente reconfigurable (imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido).

ADAPTACIÓN DE LA FIGURA 1A DE «AN ELECTROMECHANICALLY RECONFIGURABLE PLASMONIC METAMATERIAL OPERATING IN THE NEAR-INFRARED» POR J. Y. OU, E. PLUM, J. ZHANG Y N. I. ZHELUDEV, EN *NATURE NANOTECHNOLOGY*, VOL. 8, PÁGS. 252-255, ABRIL DE 2013

La primera demostración de un metamaterial en un laboratorio se hizo pública en 2000 por el físico David Smith y sus colegas en la Universidad de California en San Diego. Siguiendo el trabajo teórico realizado en los años noventa del siglo xx por John Pendry, del Colegio Imperial de Londres, estos investigadores mostraron que un conjunto matricial de diminutos hilos y anillos de cobre presentaba un índice de refracción negativo para microondas, lo que significaba que la radiación de ese tipo que incidía sobre el material se desviaba en una dirección opuesta a la observada normalmente [*véase* «Superlentes y supermateriales», por John B. Pendry y David R. Smith; Investigación y Ciencia, septiembre de 2006]. Ello desató un gran interés por los metamateriales, en parte porque la capacidad para desviar la radiación de esa forma daba la posibilidad de crear mantos de invisibilidad.

Desde entonces, Smith y otros investigadores han estudiado multitud de variaciones sobre la idea de metamaterial, a menudo intentando la manipulación de la radiación en formas que nada tienen que ver con un índice de refracción negativo. Asimismo, no se han limitado a conjuntos estáticos; han desarrollado técnicas para cambiar la disposición de los elementos, su forma y su respuesta a la radiación. Los materiales resultantes hacen cosas como transformarse de opacos en transparentes o de color rojo en azul, todo ello por la rápida acción de un interruptor.

Llegar a los consumidores

En enero de 2013, Smith, actualmente en la Universidad Duke en Durham (Carolina del Norte), asumió una tarea simul-

tánea como director de programas para la comercialización de metamateriales en Intellectual Ventures.

Puede que pronto veamos algún fruto. Kymeta, empresa surgida de Intellectual Ventures, con sede en Redmond (Washington), espera comercializar una antena compacta que sería uno de los primeros productos basados en metamateriales dirigidos al consumo. Este dispositivo relativamente barato establecería comunicaciones por satélite de banda ancha entre aviones, trenes, barcos, automóviles y cualquier otra plataforma que tenga que operar en lugares lejanos apartados de las redes de dispositivos móviles.

En el núcleo de la antena —cuyos detalles son confidenciales— hay una tarjeta plana de circuito impreso que contiene miles de elementos metamateriales electrónicos, cada uno de los cuales cambia sus propiedades en un instante mediante el *software* del dispositivo. Ello permite a la antena seguir la trayectoria de un satélite a través del espacio sin tener que mantener una orientación específica hacia él (el modo en que lo hace una antena parabólica estándar). Por el contrario, la antena permanece quieta mientras se ajustan constantemente las propiedades eléctricas de cada elemento metamaterial individual. Cuando entre en funcionamiento, las ondas emitidas desde los elementos se amplificarán mutuamente y se propagarán hacia el espacio solo en la dirección del satélite; las ondas emitidas en cualquier otra dirección se cancelarán entre sí y no irán a ninguna parte. Al mismo tiempo —y por la misma razón—, el conjunto captará perfectamente las señales que procedan del satélite.

Según Smith, esa tecnología es más compacta que otras alternativas como las antenas parabólicas. Ofrece un ahorro notable en términos de coste, peso y potencia de emisión. Kymeta ya ha realizado demostraciones a inversores y potenciales socios para su desarrollo; pero aún tiene que fijar el precio de la antena y reducir los costes de producción a la vez que se mantienen los estrictos niveles de prestaciones que exigen los organismos reguladores para cualquier dispositivo que se comunica con satélites.

Si Kymeta saca el producto al mercado, en primer lugar puede ofrecer su antena para uso en reactores privados y aviones de pasajeros. Si hay una buena respuesta de los compradores, la empresa espera incorporar la tecnología en otras líneas de producto, como unidades de comunicación por satélite portátiles y energéticamente eficientes para trabajadores en misiones de rescate o investigadores en trabajos de campo.

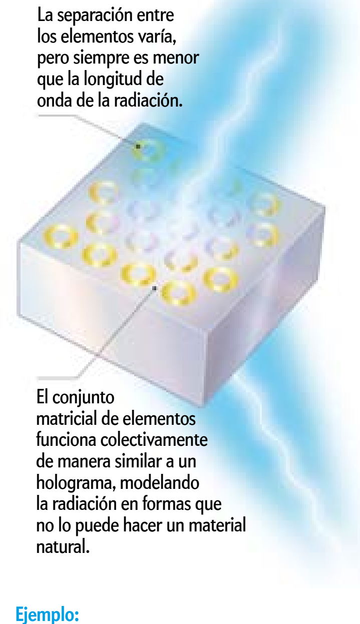
En enero de 2013, el grupo de Smith atrajo la atención cuando anunció su demostración de otro dispositivo metamaterial: una cámara que puede crear imágenes de microondas comprimidas sin lentes o partes móviles.

Una importante aplicación del dispositivo podría ser la reducción del coste y la complejidad de los escáneres de seguridad en aeropuertos. En su forma actual, estos tienen que hacer un barrido físico con un sensor de microondas sobre y alrededor del sujeto. Ello genera una enorme cantidad de datos que deben almacenarse antes de procesarse en forma de imagen. La cámara del grupo de la Universidad Duke necesita un almacenamiento de datos muy reducido. Realiza numerosas tomas instantáneas al enviar haces de microondas de múltiples longitudes de onda sobre el objetivo con una frecuencia de unas diez veces por segundo. Cuando las microondas regresan reflejadas por el sujeto, se recogen sobre una fina banda de elementos cuadrados metamateriales de cobre, cada uno de los cuales se sintoniza para dejar pasar o bloquear la radiación reflejada. El patrón resultante de elementos opacos y transparentes se puede variar con gran rapidez, de manera que cada configuración transmite una imagen instantánea simplificada de un objeto escaneado por un único sensor. El sensor mide la intensidad total de radiación de cada imagen y, seguidamente, produce una serie de números que se puede procesar digitalmente para reconstruir una imagen altamente comprimida del sujeto.

Hay que reconocer que esto es solo un primer paso: las demostraciones realizadas hasta ahora han sido pruebas rudimentarias restringidas a imágenes bidimensionales de sencillos objetos metálicos. La ampliación a imágenes tridimensionales de objetos complejos constituye aún un desafío. Pero si se supera, asegura Driscoll, los aeropuertos podrían eliminar las voluminosas, caras y lentas cabinas que actualmente constituyen los puestos de control de seguridad y usar en su lugar un número mayor de compactas y baratas cámaras con metamateriales conectadas a ordenadores. Asimismo, ello permitiría extender el escaneado para seguridad a salas, vestíbulos y pasillos en aeropuertos y otras instalaciones pertinentes.

INGENIERÍA ONDULATORIA

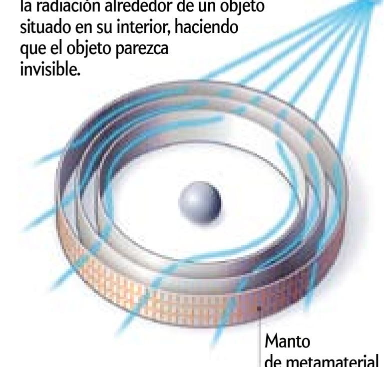
Los elementos metamateriales dispersan la radiación incidente de un modo muy concreto. Pueden adoptar cualquier forma; los ejemplos más normales corresponden a esferas, anillos, cruces y ángulos. Sus propiedades electromagnéticas a menudo pueden cambiarse mediante programas informáticos.



Ejemplo:
Índice negativo de radiación
Los metamateriales se pueden diseñar para desviar la radiación en una dirección opuesta a la observada en materiales corrientes.



Aplicación:
Manto de invisibilidad
Un manto hecho de un metamaterial con un índice negativo puede desviar la radiación alrededor de un objeto situado en su interior, haciendo que el objeto parezca invisible.



Mientras tanto, un importante objetivo de investigación es el desarrollo de dispositivos de materiales robustos y comercializables que no se restrinjan a las longitudes de onda que van de las ondas de radio al infrarrojo. Si se pudieran hacer funcionar con luz visible, resultarían mucho más útiles para aplicaciones como comunicaciones por fibra óptica o cámaras y pantallas dirigidas al consumidor.

Según advierte Stephane Larouche, miembro del equipo de investigación de Smith, no será fácil. Para un determinado tipo de radiación, los metamateriales pueden explotar sus exóticas capacidades solo si los elementos son menores que la longitud de onda de esa radiación y la separación entre ellos es inferior a esa longitud. Cuanto más corta sea la longitud de onda que deseemos utilizar, menor deberá ser cada elemento metamaterial.

En las zonas del espectro correspondientes a ondas de radio y microondas, ello es relativamente fácil, ya que las longitudes de onda se miden en centímetros y metros. Pero los elementos de metamateriales para aplicaciones ópticas tendrían que medir considerablemente menos de un micrómetro. Ello no resulta imposible: los microchips actuales de altas prestaciones contienen elementos de solo unas decenas de nanómetros. Pero, a diferencia de estos, que son esencialmente estáticos, los elementos metamateriales necesitarían en numerosas aplicaciones poder cambiar sus propiedades dinámicamente en función de las necesidades.

Enfocar en un plano

A pesar de esas dificultades, han comenzado a aparecer diseños factibles de metamateriales ópticos. Uno de ellos lo publicó en *Nature Nanotechnology* en marzo de 2013 un grupo que trabaja a las órdenes de Nikolay Zheludev, físico de la Universidad de Southampton que dirige un centro de investigación en metamateriales de la Universidad Tecnológica de Nanyang en Singapur. El dispositivo altera su capacidad para transmitir o reflejar longitudes de onda ópticas por medio de elementos metamateriales de escala nanométrica controlados eléctricamente y grabados a partir de una película de oro; algún día podría operar a modo de interruptor en redes de comunicación de fibra óptica de alta velocidad.

Debido a la dificultad para fabricar y controlar conjuntos metamateriales tridimensionales a escala óptica, algunos investigadores se están centrando en «metasuperficies» bidimensionales. En agosto de 2012, un grupo dirigido por Federico Capasso en la Universidad Harvard descubrió una lente plana de metamaterial que podía enfocar luz infrarroja hacia un punto de modo similar a una lente de vidrio.

Las lentes suelen basarse en la refracción para dirigir luz hacia un punto al hacerla pasar a través de espesores variables de vidrio. En la de Capasso, la luz pasa a través de una matriz bidimensional de elementos metamateriales de oro, grabados en una oblea de silicio de 60 nanómetros de espesor mediante técnicas de litografía por haz de electrones desarrolladas para la industria de microchips. Los elementos son fijos (no pueden ajustarse una vez fabricados). Sin embargo, a través de la selección del tamaño y el espaciado durante el proceso de fabricación, puede manipularse la luz de una determinada longitud de onda para que llegue a un punto.

Capasso previene de que probablemente todavía falte una década para lograr aplicaciones comerciales de estas lentes planas. Ello se debe, en parte, a que el silicio es un sustrato rígido y frágil para el grabado de los elementos. Se están estudiando alternativas más robustas y flexibles, más fáciles de manejar en la línea de producción. También se están buscando mejores formas de controlar el tallado de los elementos nanométricos, que debe realizarse con gran exactitud.

Una vez se domine esa técnica, una aplicación obvia sería para las cámaras de teléfonos inteligentes. Junto con las baterías, las lentes se cuentan entre los principales factores limitantes del espesor de estos teléfonos. Capasso especula que, si incorporaran cámaras con lente plana, podrían ser tan finos como una tarjeta de crédito. Además, la lente plana evita las aberraciones que afectan a las lentes de vidrio (como las «franjas» coloreadas que se producen porque no se pueden enfocar todas las longitudes de onda en el mismo punto). Podría usarse, por tanto, para mejorar los microscopios.

Aunque finalmente pudieran fabricarse con gran calidad, las lentes planas aún se hallarían sujetas al límite de difracción, que impone que ninguna lente puede resolver detalles mucho menores que la longitud de onda de la luz que incide sobre su objetivo. Para la luz visible, este límite es de unos 200 nanómetros, pero los metamateriales ofrecen un medio de fabricación de «superlentes» que podrían superar estos límites, permitiendo que los

investigadores vean detalles inferiores a la longitud de onda en objetos como virus o las estructuras en permanente cambio de las células vivas.

La clave es admitir que los detalles que se pierden aún están ahí, transportados en ondas «evanescentes» de luz reflejada que se extinguen muy rápidamente en función de la distancia al objeto iluminado. Normalmente, estas ondas se desvanecen antes de que puedan ser capturadas y focalizadas por una lente; pero una superlente de metamaterial diseñada para colocarla a una distancia de unas decenas de nanómetros de un objeto sí puede captarlas y amplificarlas.

En 2005 se demostró en *Science* una primera superlente como prueba de concepto. El trabajo lo publicó el grupo de Xiang Zhang, de la Universidad de California en Berkeley. Desarrollaron un metamaterial sencillo, consistente en una capa de plata de 35 nanómetros de espesor embutida entre capas nanométricas de cromo y plástico. Desde entonces, el equipo ha estado trabajando para refinar el concepto de superlente. En 2007, progresaron con el desarrollo de «hiperlentes» de capas curvadas y anidadas de compuestos como plata, aluminio y cuarzo (el trabajo se publicó también en *Science*). Las lentes no solo capturan ondas evanescentes, sino que también se pueden introducir en un sistema óptico estándar. En última instancia, ello podría permitir la observación de detalles inferiores a la longitud de onda a través del ocular de un microscopio. Pero la estructura y el comportamiento complejos de las hiperlentes las hace difíciles de fabricar y de usar de esta manera.

Enfoque reversible

A partir de la combinación de la óptica al uso con superlentes e hiperlentes basadas en metamateriales, Zhang espera hallar aplicaciones más alejadas de la microscopía. De la misma forma que estos artefactos pueden amplificar detalles inferiores a la longitud de onda, también pueden operar al revés: dirigiendo haces de luz hacia puntos focales de dimensiones inferiores a la longitud de onda —una propiedad de importancia potencialmente revolucionaria para la fabricación de estructuras minúsculas mediante fotolitografía—. Si pueden aprovecharse las superlentes e hiperlentes para este propósito, los haces ultrafinos de luz se podrían usar para grabar elementos mucho más pequeños que los que pueden lograrse hoy. Ello podría aumentar en gran medida la densidad de almacenamiento de datos en unidades de disco óptico, así como el número de componentes que pueden incluirse en los chips de los ordenadores.

Con todo, Smith se muestra prudente. Señala que las superlentes e hiperlentes tienden a disipar mucha más energía de la luz que pasa a través de ellas que otras avanzadas técnicas litográficas en desarrollo.

Zhang admite que las hiperlentes y superlentes no están listas todavía para asumir un papel estelar, pero cree que es muy posible que las investigaciones en curso cambien la situación en los próximos años.

—Lee Billings
Periodista científico

Artículo original publicado en *Nature* 500, págs. 138-140, 2013. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2013



INNOVACIÓN

IDEAS QUE CAMBIAN EL MUNDO

Diez proyectos de ciencia básica y aplicada que prometen un futuro mejor

Un hallazgo científico puede ser astuto, atractivo o estrafalario y, aun así, no salir nunca del laboratorio. Para transformar el mundo, una idea tiene que abrirse camino desde la mesa de diseño hasta el proceso de fabricación; lo que en la jerga de Silicon Valley se conoce como «aumento de escala». El futuro es impredecible, pero cada una de las diez innovaciones que se presentan a continuación cuenta con una buena oportunidad de mejorarlo. El primer artículo, más extenso, describe un nuevo método para diseñar materiales átomo a átomo con ayuda de superordenadores. Las breves notas que completan las páginas siguientes incluyen, entre otros, un repaso a los nuevos metamateriales, que prometen una Internet superveloz o teléfonos móviles tan finos como tarjetas de crédito, terapias génicas para convertir la flora intestinal en una aliada inmunitaria, aviones y puentes compuestos de piezas ultraligeras desmontables, y antisépticos con el potencial de evitar 500.000 muertes infantiles al año. Búsquenlos dentro de unos años.

ILUSTRACIONES DE MAREK HAIDUK

INGENIERÍA

MATERIALES VIRTUALES

Las ecuaciones de la mecánica cuántica y las simulaciones en superordenadores están permitiendo diseñar nuevos materiales átomo a átomo, sin necesidad de llevar a cabo ningún experimento previo

Gerbrand Ceder y Kristin Persson

En 1878, Thomas Edison se puso manos a la obra para reinventar la iluminación eléctrica. Dado que deseaba desarrollar bombillas pequeñas que pudieran usarse en espacios interiores, tenía que encontrar un filamento con una vida útil prolongada, que consumiese poco y que no se calentase demasiado. Guiado por su intuición, probó miles de materiales carbonosos, desde la madera y la cáscara de coco hasta los pelos de la barba de su ayudante de laboratorio. Tras catorce meses, patentó una bombilla que usaba un filamento de algodón carbonizado. La prensa tituló el hallazgo «Triunfo del gran inventor en la iluminación eléctrica». Sin embargo, había materiales mucho mejores. A principios del siglo xx, otro estadounidense perfeccionó un filamento de wolframio que aún hoy luce en nuestras bombillas incandescentes y el hilo de algodón de Edison pasó a la historia.

La ciencia de materiales, el estudio de los métodos para reconfigurar la materia y dotarla de una forma nueva y útil, ha avanzado de manera considerable desde los días de Edison. La mecánica cuántica nos ha permitido profundizar en las leyes que rigen el comportamiento de la materia y, como consecuencia, nos ha brindado una herramienta única para desarrollar una investigación basada en la teoría en lugar de en las conjeturas. Sin embargo, desarrollar nuevos materiales implica aún un proceso muy caro, largo y laborioso. Las empresas invierten en ello miles de millones cada año, pero los éxitos son contados. Los investigadores conciben todo tipo de ideas basadas en su intuición y experiencia, pero sintetizarlas y ponerlas a prueba exige una tremenda cantidad de ensayo y error. Evaluar un nuevo material puede conllevar meses de trabajo; la mayoría de las veces, con resultados negativos. Como ha comprobado nuestro colega de profesión Thomas Eagar, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, un material exitoso tarda de media entre 15 y 20 años en recorrer el camino que va de los primeros ensayos de laboratorio a su aplicación comercial. Puede que cuando Sony anunciase la comercialización de las primeras baterías de iones de litio, en 1991, el avance se presentase como un gran salto repentino. No obstante, atrás quedaban casi dos décadas de progreso titubeante y el trabajo de cientos o miles de expertos.


90°
2 sb
60°

Gerbrand Ceder es catedrático de ingeniería y ciencia de materiales en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Junto con Kristin Persson, es uno de los cofundadores del Proyecto Materiales.

Kristin Persson investiga en el Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley. Obtuvo su doctorado en física teórica en el Real Instituto de Tecnología de Estocolmo.

La ciencia de materiales se encuentra hoy al borde de una revolución. Podemos beneficiarnos de un siglo de avances en física e informática para sortear el largo proceso que tuvo que superar Edison. El crecimiento exponencial de la potencia de procesamiento de los ordenadores, combinado con el trabajo realizado en los años sesenta y setenta del pasado siglo por Walter Kohn y el difunto John Pople, quienes obtuvieron soluciones simplificadas pero precisas de las ecuaciones de la mecánica cuántica, ha hecho posible diseñar nuevos materiales partiendo de cero. La técnica, conocida como diseño de materiales por computación de alto rendimiento (*high throughput computing*), se basa en el uso de superordenadores para estudiar el comportamiento cuántico de cientos o incluso miles de compuestos químicos a la vez. Ello permite buscar con enorme eficiencia los constituyentes necesarios para crear el material deseado, ya se trate de un electrodo para una batería, una aleación metálica o un nuevo semiconductor.

La mayoría de los materiales, como los que componen los electrodos de las baterías, constan de una gran cantidad de compuestos. Otros, en cambio, son mucho más simples. El grafeno, que ha sido publicitado a bombo y platillo como el material de la electrónica del futuro, no es más que una lámina de carbono de un solo átomo de espesor. Pero, con independencia de la complejidad del material, sus propiedades (densidad, dureza, brillo, conductividad eléctrica, etcétera) siempre quedan determinadas por las características cuánticas de los átomos que lo componen. Por tanto, el primer paso para diseñar materiales con un superordenador consiste en «hacerlos crecer» virtualmente mediante la ejecución computarizada de miles de cálculos de mecánica cuántica.

Primero, el superordenador coloca sus átomos virtuales en cientos o miles de estructuras cristalinas, también virtuales. A continuación se calculan las propiedades del compuesto resultante. ¿Qué aspecto tendrá cada estructura cristalina? ¿Cuál será su resistencia mecánica? ¿Cómo absorberá la luz? ¿Qué sucederá cuando se deforme? ¿Será aislante o conductor? El ordenador se programa para que seleccione compuestos que posean propiedades de interés y, en poco tiempo, aparece el diseño de un material prometedor. Al final del proceso, los datos generados durante la investigación se introducen en una base de datos, a fin de que otros científicos puedan consultarla en el futuro.

Desde 2001, hemos estado dirigiendo una colaboración, el Proyecto Materiales, que intenta crear bases de datos gratuitas y de libre acceso que incluyan las propiedades termodinámicas y electrónicas fundamentales de todos los compuestos inorgánicos conocidos. Hasta la fecha, hemos calculado las propiedades básicas (estructura cristalina, capacidad para conducir la electricidad o la luz, etcétera) de casi todos los 35.000 materiales inorgánicos conocidos existentes en la naturaleza. También hemos calculado las propiedades de algunos miles que, en principio, existen solo en teoría. Hasta ahora, unos 5000 científicos han solicitado acceso a la base de datos con el objetivo de usarla en el diseño de materiales para células solares, baterías y otras aplicaciones.

No somos los únicos que seguimos este camino. Un consorcio de expertos dirigido por Stefano Curtarolo, de la Universidad Duke, ha calculado las propiedades de decenas de miles de aleaciones. Su investigación podría conducir al diseño de bastidores de automóviles más ligeros y resistentes, vigas estructurales para rascacielos, revestimientos aeronáuticos y otros similares. El Proyecto Informático de Materiales Cuánticos, que integra a investigadores del Laboratorio Nacional Argonne, la Universidad Stanford y la Universidad Técnica de Dinamarca, ha estado utilizando la computación de alto rendimiento para estudiar procesos catalíticos sobre superficies metálicas, algo especialmente útil en el campo de las investigaciones energéticas.

En un futuro muy próximo, los expertos en ciencia de materiales usarán la computación de alto rendimiento para diseñar casi todo. Creemos que esto generará avances de todo tipo que transformarán el mundo: revolucionarán la informática, reducirán la contaminación, generarán energía abundante y limpia, y mejorarán nuestra vida en formas que hoy resultan difíciles de imaginar.

EL GENOMA DE UN MATERIAL

El mundo moderno tal y como lo conocemos se debe al éxito de la ciencia de materiales. El desarrollo del vidrio conductor y transparente dio lugar a las pantallas táctiles de nuestros teléfonos inteligentes. La razón por la que estos dispositivos pueden transmitir información alrededor del mundo a la velocidad de la luz obedece al hallazgo de un método para fabricar vidrio sin impurezas iónicas, gracias a lo cual disfrutamos de comunicaciones por fibra óptica. Y si los mismos teléfonos gozan de 24 horas de autonomía energética es porque, durante los años setenta y ochenta, los expertos en ciencia de materiales desarrollaron los óxidos que constituyen la base de las baterías de iones de litio.

Fueron las investigaciones sobre baterías las que nos condujeron hacia el diseño de materiales por computación de alto rendimiento. Aunque nuestra trayectoria profesional ya se basa-

EN SÍNTESIS

El mundo moderno tal y como lo conocemos se debe al desarrollo de nuevos materiales, como el silicio de alta calidad para microchips o la fibra óptica. Sin embargo, una cantidad frustrante y poco eficiente de conjeturas ha intervenido históricamente en esta ciencia.

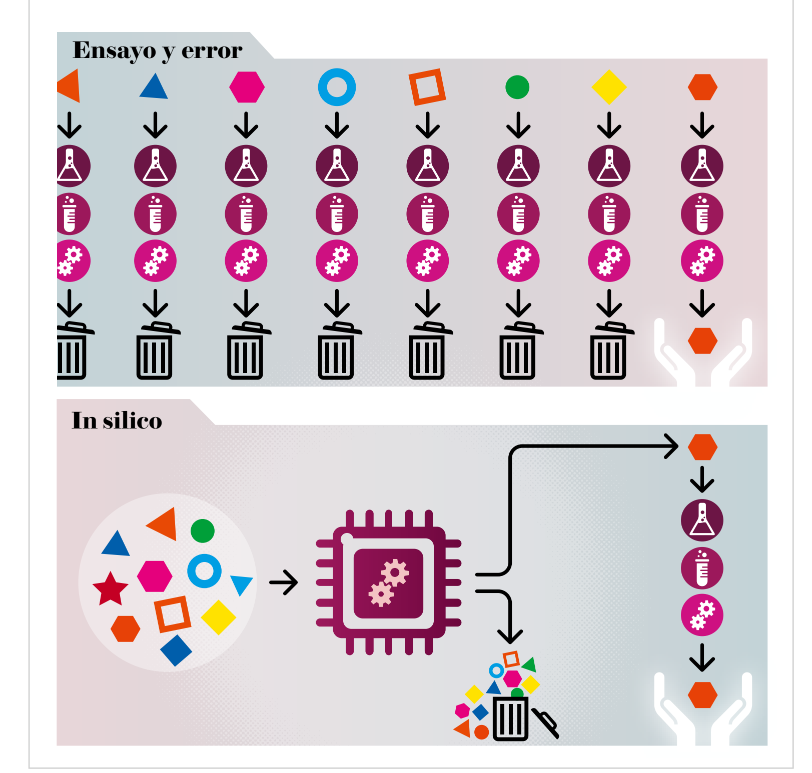
Hoy, gran parte de esas conjeturas pueden eliminarse gracias a la existencia de los superordenadores. Su capacidad para resolver las intrincadas ecuaciones de la mecánica cuántica permite calcular las propiedades de miles de configuraciones atómicas posibles.

La nueva técnica recibe el nombre de diseño de materiales por computación de alto rendimiento. Gracias a ella, se espera que pronto aparezcan nuevas baterías, placas solares, células de combustible y microchips más eficientes.

FUNDAMENTOS

Fabricación física y diseño virtual

En líneas generales, la técnica tradicional para sintetizar nuevos materiales se ha basado siempre en el método de ensayo y error. Este consiste en ensayar una por una todas las ideas que parecen razonables para, después, ir descartando las que no funcionan. Gracias al diseño de materiales mediante la computación de alto rendimiento, hoy los investigadores pueden simular las propiedades físicas y químicas de multitud de compuestos posibles, lo que ahorra tiempo, dinero y grandes dosis de frustración. Una vez que la computadora ha considerado cientos o miles de materiales virtuales, se seleccionan los más prometedores y se comienzan las pruebas de laboratorio.



ARNO GHELFI

el futuro de nuestro campo. Incorporamos personal, logramos recursos y, en 2011, lanzamos una colaboración entre el Instituto de Tecnología de Massachusetts y el Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley. Inicialmente la designamos Proyecto Genoma de Materiales. Desde entonces se han unido equipos en la Universidad de California en Berkeley, la Universidad Duke, la de Wisconsin-Madison, la de Kentucky, la Universidad Católica de Lovaina y otras instituciones. Con el tiempo, todas han ido aportando los datos de sus investigaciones a nuestro depósito central de acceso libre en el Laboratorio Nacional Lawrence.

Poco después eliminamos el término «Genoma» del nombre del proyecto, con el objetivo de distinguirlo de una iniciativa lanzada por la Oficina de Política Científica y Tecnológica de la Casa Blanca. Además, y siendo rigurosos, las propiedades de los compuestos químicos no pueden describirse en términos de genes, puesto que no constituyen piezas de información hereditaria basadas en una secuencia única de datos. Con todo, sí existe una relación directa entre las propiedades de un material y sus elementos descriptivos fundamentales. Del mismo modo que los ojos azules pueden asociarse a un gen determinado, la conductividad electrónica de un material puede derivarse de las características de los átomos que lo componen y su disposición relativa.

Esa clase de correlaciones constituyen la base de la ciencia de materiales. Consideremos un ejemplo sencillo. Hoy sabemos que podemos modificar el color de un material mediante la introducción de ciertos defectos en su estructura cristalina. Tomemos el caso del rubí, una variedad del corindón común (Al_2O_3) en la que en torno al uno por ciento de los átomos de aluminio ha sido sustituido por un ion de cromo (Cr^{3+}). Cuando este se introduce en la estructura del corindón, sus estados electrónicos se alteran, lo que modifica la manera en que el material absorbe y emite luz. Una vez que conocemos el origen de una propiedad (en este caso, el color rojo del rubí), podemos reproducirla por medios artificiales. Al ajustar de forma controlada esos defectos químicos, resulta posible diseñar rubíes sintéticos con el color que deseemos.

Las ecuaciones de la mecánica cuántica nos informan sobre el modo de llevar a cabo esos retoques, los elementos que tenemos que emplear y la manera en que deberemos colocarlos. No obstante, dichas ecuaciones resultan tan complejas que, en la práctica, solo pueden resolverse con ayuda de un ordenador. Pero, si deseamos analizar varios cientos de compuestos, necesitaremos una potencia de cálculo abrumadora. Algo así era sencillamente imposible hasta hace poco. Ello explica que la ciencia de materiales se haya fundado históricamente en el método de ensayo y error. Ahora que disponemos de la potencia de cálculo necesaria, podemos permitirnos el lujo de explotar al máximo las predicciones de la mecánica cuántica.

Supongamos que estamos investigando materiales termoeléctricos, aquellos que generan una corriente eléctrica cuando se los somete a un fuerte gradiente de temperatura. (También se da la situación inversa: un material termoeléc-

ba en el diseño de materiales por ordenador, no fue hasta 2005 cuando, durante una conversación con directivos de Procter & Gamble (P&G), tomamos conciencia de lo que podía suponer una buena dosis de tiempo de cálculo en uno de los superordenadores más potentes del mundo. Los ejecutivos de P&G deseaban mejorar los materiales del cátodo de las pilas alcalinas de su división Duracell. Nos formularon una pregunta sorprendente: ¿era posible analizar con un ordenador todos los compuestos conocidos para seleccionar el más idóneo? Al reflexionar sobre ello, nos dimos cuenta de que los únicos obstáculos reales eran el tiempo de cálculo y el dinero. La compañía nos proporcionó ambos. Invirtieron un millón de dólares en el proyecto y nos dieron carta libre para usar su centro de supercomputación.

Bautizamos nuestro programa como Proyecto Alcalino. Examinamos 130.000 compuestos reales e hipotéticos y proporcionamos a P&G una lista de 200 que cumplían los criterios que solicitaban, todos ellos con el potencial de mejorar sus propiedades químicas. Para entonces, ya nos habíamos convencido de que el diseño de materiales por computación de alto rendimiento era

trico puede experimentar una diferencia de temperatura si se hace pasar corriente a través de él; piense, por ejemplo, en un enfriamiento instantáneo.) Nuestra sociedad desperdicia cada día enormes cantidades de energía en forma de calor debido a los procesos de combustión, industriales y de refrigeración. Si contásemos con materiales termoeléctricos eficientes, baratos y estables, podríamos capturar ese calor y convertirlo en electricidad. Los dispositivos termoeléctricos podrían transformar el calor disipado por la industria en electricidad para las propias fábricas. El calor que desprende el tubo de escape de un automóvil podría emplearse para poner en marcha los dispositivos electrónicos de su interior. Y la termoelectricidad podría también aprovecharse para enfriar el estado sólido: por ejemplo, pequeños dispositivos incrustados en nuestra vestimenta que, sin más que accionar un interruptor, nos refrescasen sin necesidad de ventiladores ni compresores.

Uno de los mejores materiales termoeléctricos que se conocen es el telururo de plomo. Sin embargo, resulta demasiado tóxico y caro para su explotación comercial. Supongamos ahora que intentamos encontrar uno mejor. Sin la computación de alto rendimiento, el proceso se desarrollaría del siguiente modo. Primero buscaríamos compuestos conocidos que, al igual que el telururo de plomo, tuviesen un alto coeficiente de Seebeck (una medida de la cantidad de electricidad que se genera en función de la diferencia de temperatura), pero cuya composición no incluyese elementos raros, tóxicos o demasiado costosos. Consultaríamos tablas y compararíamos números. Con suerte, daríamos con algunos compuestos candidatos que, al menos en teoría, podrían funcionar. A continuación deberíamos fabricarlos. Sintetizar un compuesto constituye una tarea ardua, cara y muy laboriosa. En general, resulta imposible aventurar incluso si el material obtenido será estable. Si lo es, solo podremos medir sus propiedades tras haber sintetizado el compuesto y repetido el proceso hasta obtener una muestra de suficiente pureza. El proceso puede prolongarse durante meses para cada compuesto.

Hasta ahora, nadie ha encontrado materiales termoeléctricos alternativos. Sin embargo, aún no se ha intentado diseñarlos por el método de computación de alto rendimiento. Eso cambiará dentro de poco. A partir de este año, empezaremos a colaborar con investigadores del Instituto de Tecnología de California y otras cinco instituciones con el objetivo de encontrar compuestos químicos que hagan realidad las técnicas de ahorro energético y refrigeración mencionadas arriba.

UNA NUEVA EDAD DE ORO

Por el momento, nuestra capacidad para acceder, buscar, seleccionar y comparar datos de materiales de forma automatizada se encuentra en su infancia. Cuando la técnica avance, ¿qué nos ofrecerá? A continuación aventuramos algunas posibilidades.

Buena parte de las técnicas que prometen una energía limpia están esperando el desarrollo de los materiales adecuados para hacerse realidad. Algunos compuestos fotocatalíticos, como el dióxido de titanio, se emplean para convertir la luz solar y el agua en oxígeno e hidrógeno, el cual puede procesarse como combustible líquido. Otros fotocatalizadores funcionan de modo similar, pero con dióxido de carbono. El gran objetivo de esta línea de investigación es crear una «hoja artificial» que convierta la luz y el aire en combustibles líquidos similares al metanol [*véase* «Hojas artificiales», por Antonio Regalado; Investigación y Ciencia, diciembre de 2010]. Los investigadores del Centro Conjunto para Fotosíntesis Artificial, una institución del Departamento de Energía de Estados Unidos, ya han comenzado a usar métodos de alto rendimiento en su búsqueda de materiales con tales propiedades.

Otra posibilidad radica en el desarrollo de nuevas aleaciones metálicas para aviones y automóviles. Reducir el peso de un vehículo en un diez por ciento puede revertir en un ahorro de combustible de entre el seis y el ocho por ciento. Cada año, la industria estadounidense gasta miles de millones de dólares en I+D para lograr nuevos metales y aleaciones. El diseño de materiales mediante computación de alto rendimiento podría multiplicar esa inversión. El desarrollo de aleaciones ligeras, reciclables y de gran resistencia mecánica tendría un impacto tremendo sobre la economía mundial, debido a un mejor rendimiento energético en el transporte y la construcción.

La informática es otro campo que necesita nuevos materiales. Varios estudios recientes parecen indicar que nos acercamos al final de la ley de Moore, que dicta que la potencia de cálculo de los ordenadores se duplica cada dos años. Hace tiempo que sabemos que el silicio no es el mejor semiconductor; sin embargo, lo usamos debido a su gran abundancia y a que conocemos bien sus propiedades. ¿Qué podría superarlo? La clave consiste en encontrar materiales que puedan conmutar rápidamente entre los estados de aislante y conductor. Un equipo en la Universidad de California en Los Ángeles ha fabricado transistores de grafeno muy veloces. Al mismo tiempo, un grupo de Stanford ha referido un método que permite cambiar el estado de la magnetita en una billonésima de segundo, miles de veces más rápido que los transistores actuales. La computación de alto rendimiento permitirá elegir entre ambas posibilidades.

La lista se amplía a nuevos superconductores, catalizadores y escintiladores, tres aplicaciones que transformarían por completo la tecnología de la información, la captura y retención de carbono, y la detección de material nuclear.

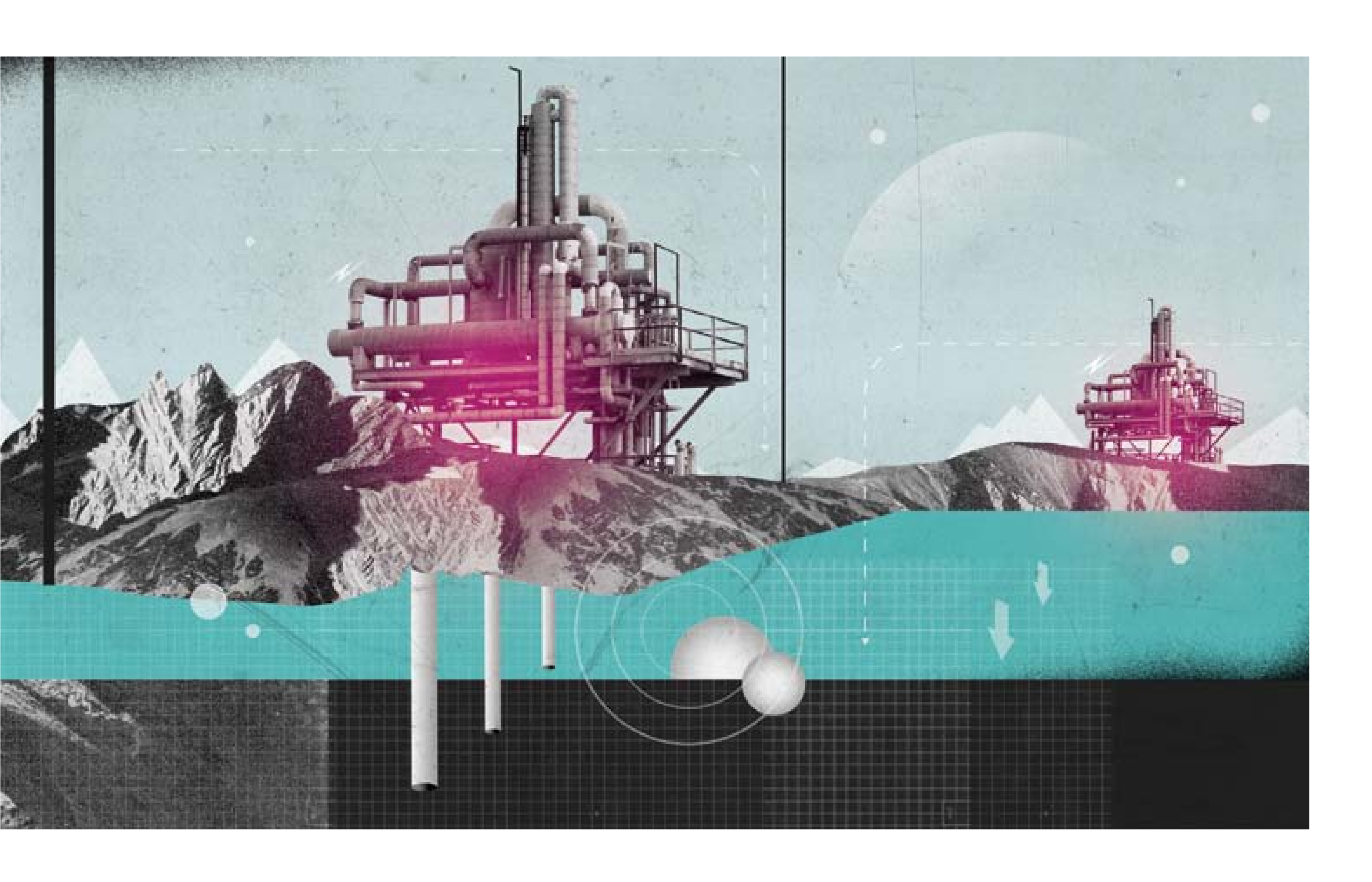
El diseño de nuevos compuestos mediante computación de alto rendimiento podría también espolear avances muy difíciles de imaginar hoy en día. Quizá nos permita inventar un nuevo combustible líquido basado en silicio en lugar de carbono, más eficiente que la gasolina y cuyos productos de reacción fuesen agua y arena inocua. Hace décadas que esta idea ronda por la cabeza de los investigadores, pero hasta ahora nadie ha encontrado una manera de llevarla a la práctica. Los superordenadores tal vez puedan decirnos si un proyecto así tiene un mínimo de sentido o si, por el contrario, deberíamos dirigir nuestros pasos en otra dirección.

Por todo lo anterior, creemos que nos estamos adentrando en una edad de oro en lo que se refiere al diseño de nuevos materiales. La enorme potencia de cálculo de la que disponemos hoy en día nos ha brindado una capacidad sin precedentes para transformar la materia prima en productos útiles. En una época en la que habremos de lidiar con un planeta cada vez más caliente y superpoblado, esta nueva edad de oro nunca llegará demasiado pronto.

PARA SABER MÁS

Opportunities and challenges for first-principles materials design and applications to Li battery materials. Gerbrand Ceder en *MRS Bulletin*, vol. 35, n.º 1, págs. 693-710, septiembre de 2010.

The materials project: A materials genome approach to accelerating materials innovation. Anubhav Jain y otros en *APL Materials*, vol. 1, n.º 1, julio de 2013.



CLIMA

Captura y petrificación del CO_2

¿Y si existiese un proceso sencillo para extraer el dióxido de carbono de las centrales térmicas y volverlo a convertir en una roca subterránea inamovible? Una técnica semejante sortearía uno de los principales obstáculos a los que se enfrentan las propuestas actuales para secuestrar carbono. Estas implican inyectar CO_2 en formaciones sedimentarias porosas, como la arenisca; sin embargo, en tal caso existe el riesgo de que el gas se filtre, escape de nuevo hacia la atmósfera y caliente el planeta.

Las rocas basálticas, que dan cuenta de una parte de la corteza terrestre, podrían proporcionar una alternativa a las estructuras sedimentarias. Los minerales que componen el basalto, como el magnesio, el calcio y el hierro, reaccionan con el CO_2 y forman cristales de carbonatos que quedan atrapados entre los poros y grietas de la roca, lo que enterraría el gas en una tumba permanente. El proceso, conocido como erosión inducida, permitiría capturar enormes cantidades de CO_2. Ahora los ingenieros intentan llevar estas nociones de química a la práctica.

El verano pasado, cerca de Wallula, en Washington, se inyectaron unas 1000 toneladas de CO_2 en basalto estratificado a más de 800 metros de profundidad. Durante este año, los ingenieros evaluarán la extensión y el ritmo de formación de carbonatos cristalinos. Aunque algunos expertos aseguran que en condiciones naturales el proceso podría durar milenios, varias pruebas de laboratorio sugieren que tal vez no tardase ni una década. «No serían mil años; ni siquiera algunos siglos», apunta Pete McGrail, ingeniero ambiental del Laboratorio Nacional del Pacífico Noroccidental y supervisor del proyecto. La mineralización podría concluir en unos años, o tal vez varias décadas, un período de tiempo que sí marcaría una diferencia en la lucha contra el calentamiento global.

Los ingenieros de Carbfix, otro proyecto similar en Islandia, intentarán inyectar 1500 toneladas de CO_2 durante dos años. Según Juerg Matter, investigador de la Universidad de Columbia dedicado al proyecto, en mayo y junio de 2014 se extraerán muestras; después, las observaciones se prolongarán hasta diciembre.

Algunos científicos no creen que los minerales de carbono sean tan herméticos. Susan Hovorka, geóloga especialista en secuestro de carbono de la Universidad de Texas en Austin, apunta que, en ciertos casos, las aguas profundas podrían filtrarse a través de los carbonatos cristalinos y disolver el CO_2, con lo que el gas podría filtrarse hacia la superficie. Según ella, será preciso comprobar la verdadera capacidad de retención del basalto.

Con todo, el principal obstáculo para almacenar carbono es más político que técnico, sostiene McGrail. Sin incentivos económicos para llevar a cabo el proceso —ya sea con esta u otra técnica—, resultará difícil que se generalice. No obstante, si los proyectos en curso demostrasen que el basalto sí puede capturar el gas y a ello se sumasen medidas políticas de tasas al carbono, el basalto estaría ofreciendo una opción viable como medio de captura. En torno a una cuarta parte de las nume-

rosas centrales de carbón de la India descansan sobre una formación basáltica, las Trampas del Decán. Si la roca fuese capaz de devolver el perverso agente del calentamiento a su lugar de origen, habría enormes cantidades de CO_2 ya listas para ser enterradas.

—*Dave Levitan*

NUEVOS MATERIALES

Piezas ultraligeras acoplables



El año pasado, los investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) quedaron muy satisfechos tras probar en un túnel de viento un nuevo material compuesto, ultraligero y muy resistente: una sustancia flexible y reticulada que puede ensamblarse como piezas de Lego. Esa propiedad le permite formar estructuras tridimensionales diez veces más rígidas por unidad de peso que los materiales ultraligeros conocidos hasta ahora. Los ingenieros han fabricado con ella prototipos de planos de sustentación y estructuras de alas, a fin de evaluar su flexibilidad y capacidad de deformación ante fuertes corrientes de aire. Se trata de un gran paso hacia el objetivo de disponer de aviones, naves espaciales o incluso puentes más ligeros y duraderos, los cuales se construirían a partir del ensamblaje de múltiples piezas básicas.

La nueva sustancia implica una manera completamente nueva de concebir los materiales que podría derivar en armazones muy resistentes e increíblemente ligeros para productos aeroespaciales, industriales y bienes de consumo. Su diseño se inspira en las estructuras reticulares del hueso esponjoso, el tejido que confiere al esqueleto de los animales una gran resistencia con muy poco peso.

El nuevo material podría superar las limitaciones de tamaño que las técnicas de fabricación actuales imponen sobre las estructuras ultraligeras. Los materiales compuestos suelen construirse a partir de varias capas de fibra moldeada untada en resina. A través de un proceso de curado térmico, la resina se endurece y adopta la forma deseada. Fabricar estructuras de gran tamaño exige disponer de enormes hornos cilíndricos en los que deben curarse las grandes piezas que luego se ensamblarán. Sin embargo, el nuevo material del MIT permitiría fabricar el fuselaje entero de un avión sin emplear un solo remache, pues cada pieza se ensambla a las adyacentes hasta completar toda la estructura. Las partes pueden también desacoplarse, lo que permitiría reparar o modificar un avión o un puente in situ, o incluso desmontarlo para reciclar las piezas.

Para Hod Lipson, profesor de ingeniería mecánica y aeroespacial de la Universidad Cornell que no participó en el proyecto, la nueva sustancia extiende la propia noción de material. Los materiales habituales repiten el ordenamiento de sus componentes básicos a escala atómica y molecular; el nuevo invento, sin embargo, se repite a sí mismo a escalas mucho mayores, lo que resulta en un conjunto muy sólido, flexible y resistente. Las estructuras así formadas no desarrollarían fisuras potencialmente catastróficas; además, la capacidad para ensamblarlas pieza a pieza facilitaría la fabricación de objetos a medida.

Su elemento básico es un polímero reforzado con fibra de carbono, con forma de una X plana de unos cinco centímetros de anchura, con un nodo rectangular en el centro y pequeños bucles en el extremo de cada brazo. La unión entre pieza y pieza se realiza conectando un bucle con un nodo. Cada uno de estos sujeta cuatro bucles, amarrados con una broche rígido de fibra de carbono. El resultado es un retículo cúbico de celdas octaédricas, geometría que recibe el nombre de *cuboct*. El laboratorio del

Un robot de elastómeros permitiría realizar angioplastias fijándose a las paredes de los vasos sanguíneos sin dañarlas

MIT ha construido y ensayado docenas de bloques con diversas longitudes de brazo, desde los quince centímetros hasta pocos milímetros. La densidad del material (dependiente del grosor del brazo) y el tamaño de la celda (determinada por la longitud de este) influyen en la rigidez y el peso finales, características que gobiernan su capacidad para resistir doblamientos y abolladuras.

Sin embargo, la manera óptima de ensamblar las piezas continúa planteando problemas. Por el momento, los ingenieros deben ensamblar penosamente las piezas con pequeñas pinzas. El Centro de Bits y Átomos del MIT está desarrollando un equipo de robots capaces de construir objetos con el nuevo material o trepar por las estructuras ya formadas para efectuar reparaciones. Kenneth Chaung, antiguo investigador del MIT que colaboró en el desarrollo del compuesto y que hoy trabaja en el Centro de Investigación Ames, de la NASA, opina que un sistema de ensamblaje trabajaría mejor con un tipo de robot dedicado a cada tarea, como la inspección, la instalación o el desmontaje.

Otros investigadores están abordando el problema de la rapidez de ensamblaje. Lipson dirige un grupo que ha diseñado robots capaces de identificar dónde están y hacia dónde han de ir. Cree que tales máquinas podrían construir estructuras formadas por miles de millones de elementos básicos. El uso de robots permitiría levantar rápidamente diques temporales en caso de inundación o incluso fabricar satélites en el espacio.

El material compuesto tendrá que cumplir los estándares de calidad y seguridad antes de entrar en una cadena de montaje robótica que fabrique aviones o automóviles. Según Cheung, podrán construirse estructuras completamente nuevas, como aviones con alas transformables y robots con brazos flexibles pero sin junturas. Añade, sin embargo, que el material probablemente encuentre sus primeros usos en otras aplicaciones, como satélites no tripulados o sondas espaciales que se lancen en los próximos años.

—*Marissa Fessenden*

INGENIERÍA

Robots blandos

Los equipos de rescate llegan a una zona donde acaba de derrumbarse una mina y cavan un agujero de cientos de metros de profundidad. Para localizar a los supervivientes, introducen en el pozo un robot cilíndrico de metal provisto de una cámara. Durante el descenso, sin embargo, la tierra se mueve y el diámetro del conducto se reduce a la mitad. La presión aplasta el artefacto. ¿Qué hacer ahora? Si el robot hubiera estado hecho de polímeros deformables, se habría estrechado como un gusano y continuado su tarea.

Los robots blandos aún no han salido de los laboratorios. Pero los avances en ciencia de materiales, teoría de control, almacenamiento de energía y electrónica flexible podrían cambiar la situación. Tal vez en un futuro no tan lejano dispongamos de autómatas plegables que realicen dificultosas tareas en minas, fábricas o el interior del cuerpo humano.

Con ese objetivo en mente, los ingenieros toman nota de los movimientos de pulpos, gusanos y otros invertebrados. ¿Por qué gastar tiempo y dinero en recrear una mano con actuadores, cables y motores, cuando un tentáculo de polímero accionado por medios neumáticos podría lograr el mismo resultado con mayor eficiencia y a un coste menor? En un experimento, un grupo de investigadores de la Universidad Cornell fabricó una «garra universal» a partir de una bola llena de aire y café molido. Al entrar en contacto con un objeto, la garra se adaptaba a su forma. Y si se practicaba el vacío en su interior, se tornaba algo más rígida y asía el objeto con suavidad. De igual modo, un robot podría fabricarse con polímeros blandos que se dilatasen, se contrajesen y se doblasen en respuesta a señales eléctricas.

Los robots tradicionales, inspirados en los vertebrados, tal vez sean más rápidos y resistentes que sus equivalentes flexibles. Pero estos últimos podrían manipular mejor cualquier artilugio y serían más versátiles en todo tipo de entornos. Además, su composición gomosa los haría más resistentes frente a las caídas o los pisoteos en el suelo del taller.

Los miembros de Grupo de Investigación Whitesides, de Harvard, han empleado polímeros para fabricar una serie de robots que pueden cambiar de forma; entre ellos, un cuadrúpedo de un metro de largo que recuerda a dos Y unidas por la base. Cuando se bombea aire en las capas de canales neumáticos del robot, el objeto se infla, se dobla y mueve las patas para avanzar poco a poco. Dotado de una batería y un compresor de aire, el robot ya ha demostrado que puede desenvolverse por el suelo del laboratorio, sobre la nieve e incluso sobre una parrilla caliente. En 2011 apareció una versión con cable y mucho más pequeña que podía encogerse hasta pasar por un hueco de pocos centímetros de altura. «El abanico de posibilidades aumenta de manera notable si el robot es inalámbrico, una frontera que ya hemos traspasado», señala George M. Whitesides, experto en materiales de Harvard. Para conseguir que el robot se mueva más rápido, los ingenieros están intentando mejorar la transferencia de aire a través de los canales interiores, a fin de evitar que haya partes del robot que se inflen sin necesidad.

Animados por tales progresos, algunos inversores ya están intentando patentar la idea. Hace poco fundaron Soft Robotics, una compañía que se centrará en las aplicaciones biomédicas. Un robot fabricado con elastómeros, por ejemplo, ayudaría a realizar biopsias o angioplastias asiendo con delicadeza los tejidos o fijándose a las paredes de los vasos sanguíneos sin dañarlas.

Según el primer número de la revista *Soft Robotics*, de aquí a diez años tal vez veamos el estreno comercial de los robots blandos en forma de dispositivos que podremos llevar encima: músculos artificiales que sirvan de ayuda a personas con deficiencias motrices o a quienes tengan que levantar grandes pesos en el trabajo. La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa estadounidense también se ha mostrado dispuesta

a financiar el desarrollo de robots blandos para misiones de reconocimiento y construcción de prótesis.

El éxito de la robótica blanda, sin embargo, depende del progreso en otras disciplinas. Investigadores de la Universidad de Carolina del Norte han abordado el problema del ángulo que pueden tolerar los materiales mediante el desarrollo de un hidrogel que puede moldearse, doblarse y utilizarse para manipular objetos. Los hidrogeles, cuyo agente expansor es el agua, son elásticos, translúcidos y potencialmente biocompatibles. En un experimento en el que se inyectaron iones de cobre en un segmento de hidrogel en forma de V, este se dobló como si fuera un alicate. En otro, una reacción química logró que una pieza de hidrogel con forma de X se convirtiera en un gancho con cuatro puntas.

Pero la mayor ventaja de los robots blandos quizá sea una muy fácil de pasar por alto. El coste de un trozo de polímero, unos conductos de aire y una pequeña fuente de energía no es sino una fracción de lo que cuesta un robot metálico móvil. Este ahorro podría hacer que proliferasen por doquier... siempre y cuando estemos dispuestos a aceptar que nuestros robots tengan aspecto de cefalópodos, y no la apariencia humanoide a la que tan acostumbrados nos tiene la ciencia ficción.

—*Larry Greenemeier*

FÍSICA

Metamateriales

La estructura microscópica de los metamateriales permite desviar, dispersar o transmitir la luz de un modo imposible de lograr con materiales naturales

Nikolay Zheludev habla desde el Reino Unido, pero su voz se oye en Nueva York gracias al tendido eléctrico, los cables de fibra óptica y las microondas. Sin embargo, el retardo y el ruido dificultan la conversación. Desde la Universidad de Southampton, el investigador relata las bondades de los metamateriales: estructuras artificiales llamadas a mejorar y abaratar casi cualquier dispositivo imaginable. Nuestra conversación transoceánica constituye un buen ejemplo, asegura: una red formada por fibra óptica y metamateriales eliminaría las incómodas pausas y la diafonía que se producen al final de las frases. «Ya no tenemos que limitarnos a usar lo que la naturaleza o la química ponen a nuestra disposición», asegura Zheludev. «Podemos hacerlo mejor.»

Los metamateriales son estructuras formadas por elementos microscópicos (como barritas o anillos metálicos) cuya disposición permite desviar, dispersar o transmitir la radiación electromagnética de un modo imposible de lograr con los materiales naturales. Para ello, dichos elementos deben ser más pequeños que la longitud de onda de la radiación que se desea manipular. Imagine una red diminuta en la que, al ajustar el tamaño y la disposición de sus huecos, no solo pudiésemos reflejar o dejar pasar la luz, sino también desviar su trayectoria a voluntad, cambiar su color o incluso hacerla desaparecer. Debido a esas propiedades, los metamateriales podrían mejorar la fiabilidad de las conexiones inalámbricas a Internet, aumentar la densidad de almacenamiento de datos y, en general, mejorar cualquier dispositivo electrónico, por no hablar de la posibilidad de fabricar teléfonos inteligentes tan finos como una tarjeta de crédito.

Buena parte de esos adelantos, sin embargo, no llegarán hasta que se consigan metamateriales capaces de manipular la luz visible. Por ahora, estas estructuras funcionan mejor con longitudes de onda más largas, como las de radio y las microondas. Ello se debe a que dichas frecuencias requieren que los pequeños elementos que componen el metamaterial midan unas decenas de milímetros, no menos, por lo que resultan fáciles de fabricar mediante las técnicas habituales.

En enero de 2012, un equipo dirigido por David Smith, de la Universidad Duke, presentó una cámara de microondas fabricada con metamateriales, la cual operaba con un sistema de almacenamiento de datos y unos sensores mínimos, propiedades que la convierten en una buena candidata para reemplazar los voluminosos y costosos escáneres de microondas empleados en los sistemas de seguridad de algunos aeropuertos. La empresa Kymeta ha comenzado a aplicar el trabajo de Smith a una nueva antena reconfigurable, de baja potencia y gran anchura de banda, destinada a aviones, barcos, trenes y coches. Podría comenzar a comercializarse este año y permitiría llevar Internet de alta velocidad y bajo coste a los pasajeros de esos vehículos. Otra aplicación de los metamateriales son las capas de invisibilidad: recubrimientos que hacen que las ondas de radio y las microondas circunvalen los objetos, con lo que los tornan invisibles al radar.

Construir metamateriales para longitudes de onda más cortas, como la luz visible, resulta más complicado. El proceso implicaría fabricar piezas mucho menores que un micrómetro, de tamaño similar a los componentes de los circuitos integrados modernos. Además, multitud de aplicaciones requieren que la configuración de esos elementos cambie durante su operación.

Zheludev y sus colaboradores han conseguido crear algunas de esas disposiciones dinámicas, a las que llaman «metadispositivos». En marzo del año pasado presentaron los fundamentos de un metadispositivo óptico, formado por elementos nanométricos grabados en una película de oro y conectados a cuerdas microscópicas. La posición de cada uno de ellos podía controlarse electrónicamente por medio de las cuerdas, lo que permitía reconfigurar en tiempo real la estructura del dispositivo, a fin de alterar la forma en que transmitía o reflejaba la luz visible. Según Zheludev, podría emplearse en comunicaciones ópticas y en ordenadores ultrarrápidos.

Sin embargo, la mejor manera de conseguir metamateriales que funcionen con luz visible o en el infrarrojo cercano quizá sea perfeccionar primero las «metasuper-



ficies» planas, explica Federico Capasso, investigador en Harvard. Solo después cabría considerar la fabricación de estructuras tridimensionales más complejas, necesarias para aplicaciones como pantallas holográficas en colores reales o capas de invisibilidad como la de Harry Potter. Hasta ahora, el éxito más notable del grupo tal vez sea la «lente plana», capaz de concentrar con enorme precisión un haz luminoso en un punto. Algún día el invento podría dar lugar a cámaras digitales y teléfonos inteligentes tan finos como obleas, pues son las lentes y las baterías lo que limita el grosor de estos dispositivos.

Aunque aún queda un largo camino antes de que se generalice el uso de metamateriales en aplicaciones cotidianas, Capasso se muestra convencido de que se trata de una línea de investigación prometedora. [*véase una ampliación de esta nota en* «Los metamateriales se acercan al mercado», *en la sección Panorama*.]

—Lee Billings

MICROBIOLOGÍA

Uso terapéutico de los microbios

Para mantenerse sano, nuestro cuerpo depende de billones de bacterias, hongos, arqueas y virus que habitan en nuestra boca, piel e intestinos. Hasta hace poco se ignoraba cómo estudiarlos, pues tales organismos no se prestan bien a los cultivos de laboratorio. Sin embargo, la rápida evolución de las técnicas de secuenciación genética a bajo coste está permitiendo lograr ese objetivo. Al colaborar con esos microorganismos en lugar de combatirlos, los científicos están descubriendo sorprendentes tratamientos contra enfermedades que se resistían, así como otras formas de mejorar nuestra salud.

Hace apenas unos años nadie concebía la posibilidad de estudiar grandes comunidades de microorganismos. Ahora, tales experimentos resultan viables y asequibles, explica David Relman, profesor de la facultad de medicina de Stanford. La metagenómica, una disciplina incipiente, está ofreciendo una perspectiva amplia de los rasgos que caracterizan la microbiota («flora») de individuos sanos y enfermos. Con esa información, los investigadores están explorando la posibilidad de alterar la composición de la microbiota para tratar la obesidad, la inflamación intestinal y otras enfermedades más o menos habituales.

Así, los investigadores han caracterizado las poblaciones de microorganismos de quienes padecen colitis ulcerosa, un trastorno relacionado con los cambios en la microbiota intestinal y que provoca úlceras en el colon. A raíz de ello, el gigante farmacéutico Johnson & Johnson (J&J) anunció el verano pasado un acuerdo por 6,5 millones de dólares con Second Genome, una nueva empresa del sector, para investigar el desarrollo de futuros tratamientos. Los métodos actuales, basados en antiinflamatorios, inmunodepresores y cirugía, a menudo no surten efecto. Una terapia que modificase directamente la microbiota tal vez acarrease menos efectos secundarios y, con el tiempo, evitase otras infecciones.

El acuerdo con J&J marca un punto de inflexión, apunta Rita Colwell, de las universidades de Maryland y Johns Hopkins: «Para todo avance en biotecnología llega un momento que resulta clave: cuando el interés que suscita pasa de la academia a la industria», apunta. «El siguiente paso tiene lugar cuando comienza a llegar dinero de las grandes compañías farmacéuticas.»

Los nuevos tratamientos podrían suponer un gran avance con respecto a los intentos actuales de mejorar el microbioma, basados sobre todo en trasplantes fecales y administración de probióticos (cultivos de bacterias vivas en suplementos o en alimentos como el yogur). Los trasplantes fecales han ayudado a paliar las infecciones de *Clostridium difficile*, una bacteria que libera toxinas y a menudo es resistente a los fármacos. Sin embargo, esta práctica

puede requerir múltiples trasplantes y el paciente no siempre mejora. En cuanto a los probióticos, los indicios sobre su eficacia son más bien escasos. En cualquier caso, ambos tratamientos consisten en incorporar nuevos microorganismos al intestino y esperar a ver qué ocurre.

La metagenómica, en cambio, constituye un enfoque mucho más específico, pues proporciona un perfil genético preciso de los organismos que residen en el intestino y ofrece la posibilidad de deducir cómo interactúan, tanto entre sí como con nuestro cuerpo.

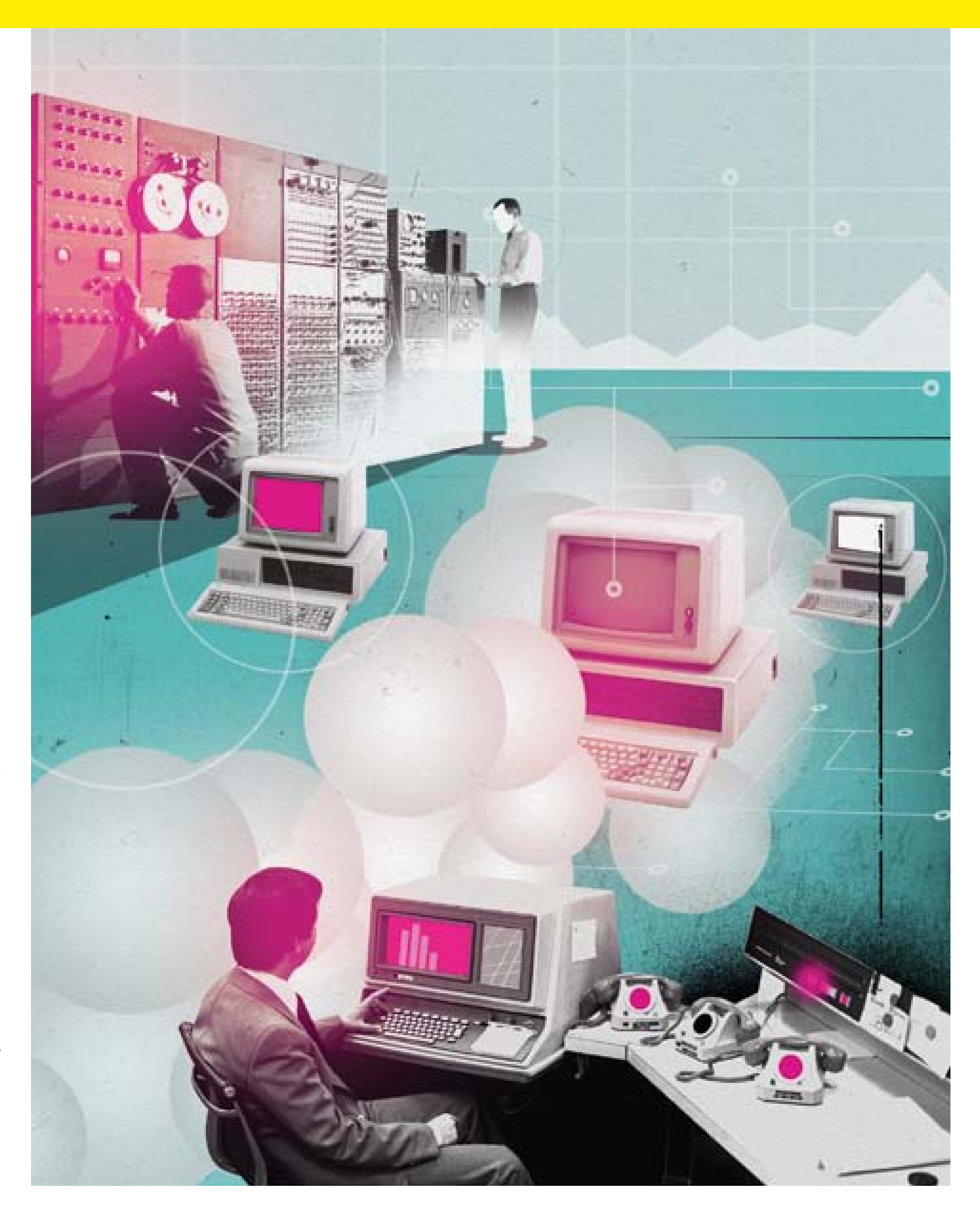
Uno de los mayores retos de la metagenómica consiste en hacer frente a una abrumadora cantidad de datos. Ahora que los investigadores pueden secuenciar ristras de comunidades microbianas, deben averiguar qué significado aporta esa información acerca de nuestra salud. Por ello, los matemáticos han comenzado a colaborar con los biólogos con el objetivo de desarrollar nuevas herramientas para analizar el ADN. Los médicos deberán después averiguar qué cambios en el microbioma de un individuo protegen o mejoran su salud y por qué. (Hay individuos que portan *Escherichia coli* pero no por ello enferman.)

Relman compara el objetivo de mantener el microbioma en buen estado con la conservación de un ecosistema. Un cuidado efectivo debería de tratar de mantener a raya al equivalente intestinal de las malas hierbas. De hecho, la metagenómica incita a pensar en nuestras comunidades microbianas como en un pedazo de tierra cultivada.

Ello supondría un cambio enorme con respecto a los tratamientos basados en actuar una sola vez sobre el organismo, que a menudo ejercen efectos perjudiciales. Los antibióticos de amplio espectro, por ejemplo, arrasan tanto las bacterias benignas como las malignas, lo que a su vez puede dejar paso a otros microorganismos perniciosos. Los inhibidores de la bomba de protones, vendidos en farmacias como remedio contra la acidez de estómago, alteran el *p*H en el órgano, lo que puede resultar perjudicial para multitud de microorganismos beneficiosos.

Los tratamientos metagenómicos podrían abarcar toda una serie de intervenciones pensadas para alterar la microbiota de forma calculada, incorporando los microorganismos propios de un intestino sano y acompañando el proceso de una alimentación y un estilo de vida saludables.

—*Katherine Harmon Courage*



INFORMÁTICA

Chips contra el espionaje en la nube

Al conectar ordenadores portátiles y teléfonos inteligentes a enormes centros de cálculo, la computación en la nube permite disfrutar de una capacidad de procesamiento mucho mayor que la que podría ofrecer cualquiera de esos dispositivos por sí solo. Gracias a la nube podemos también acceder a todos nuestros datos y documentos desde cualquier parte del mundo. Sin embargo, su talón de Aquiles es la seguridad: los datos que residen en la nube resultan vulnerables a los ataques informáticos.

Pero tal vez exista una manera de contrarrestar dos de los peores ataques que pueden sufrir los grandes servidores. Los investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) afirman haber encontrado un método para evitar tanto el espionaje de los patrones de acceso a la memoria como la vigilancia del tiempo que requieren ciertas operaciones. La solución consistiría en instalar un chip llamado Ascend, el cual emitiría

Un nuevo chip evita que un atacante pueda deducir cuánto tiempo tarda la computadora en ejecutar determinadas operaciones

información falsa —una especie de cortina de humo— cada vez que una fuente remota solicite datos.

Aunque los datos estén encriptados y un intruso no pueda leerlos, la manera en que el ordenador los almacena y accede a ellos (sus patrones de acceso a memoria) puede acabar revelando todo tipo de detalles. Supongamos que alguien accede a Google Maps y consulta una ruta para ir de Boston a Toronto. «Mediante un análisis de los patrones de acceso, un intruso puede deducir dónde se encuentra su coche, la ruta y el lugar de destino», explica Christopher Fletcher, del MIT.

Otra manera de obtener información consiste en analizar el tiempo que se tarda en ejecutar ciertas operaciones. Imaginemos que a un servidor se le pide comparar la fotografía policial de un sospechoso con imágenes de Internet tomadas al azar. «La fotografía del sospechoso podría estar encriptada y a salvo de intrusos; sin embargo, un programa que espiase en la nube aún podría deducir con qué imágenes públicas se la ha comparado», observa Fletcher. El tiempo que se demoran esas comparaciones podría revelar algunos rasgos de la imagen del presunto criminal: «Las fotos de rostros muy diferentes al del sospechoso se descartan con facilidad, pero distinguir entre dos personas que guardan cierto parecido lleva más tiempo», explica el investigador.

La peligrosidad de esos dos tipos de ataques estriba en que pasan desapercibidos. Quien escruta los mapas de Google y quienes analizan la fotografía del criminal obtienen los mismos resultados tanto si un intruso ha estado espiando esas operaciones como si no. «No saben que su seguridad está comprometida», señala Fletcher.

Una posible protección contra los ataques de acceso a la memoria consistiría en que, cada vez que el servidor solicitase datos de una dirección, también pidiese información a todas las direcciones que conozca. Después, eliminaría todos los datos salvo aquellos que realmente estaba buscando. Sin embargo, el problema con este método es obvio: consumiría un tiempo excesivo.

El chip Ascend se basa en un método mucho más económico. Primero asigna un conjunto de datos a un nodo aleatorio de una red. Cuando el procesador solicita datos sobre un nodo determinado (una dirección en Toronto, por ejemplo), envía peticiones a todos los otros nodos de la red que se encuentren conectados con el primero: nodos que contienen direcciones desde Tampa hasta Tombuctú. Así, un espía nunca podría saber qué nodo está buscando el ordenador. Para asegurar la eficacia del método, Ascend podría también cambiar la posición de los nodos.

La protección contra los ataques de temporización resultaría más sencilla: el chip accede a la memoria a intervalos regulares, aunque el procesador esté ocupado y no necesite nuevos datos. De esta manera, el atacante no lograría deducir cuánto tiempo ha invertido el ordenador en un conjunto específico de datos.

Pero esa seguridad tiene un precio: la velocidad a la que trabajaría Ascend sería seis veces menor que la de los chips que ejecutan los programas habituales más demandados por los usuarios. «Es la diferencia entre obtener un resultado en Google a la velocidad a la que lo hacemos actualmente o tener que esperar varios segundos», señala Fletcher.

Pero el mayor inconveniente, al menos por ahora, es que el chip solo existe en teoría. Fletcher y sus colaboradores detallaron su arquitectura el pasado mes de junio durante el Simposio Internacional sobre Arquitectura de Ordenadores, celebrado en Tel Aviv. Esperan tener terminado el primer prototipo a principios de 2015.

—Charles Q. Choi

MICROFLUÍDICA

Kit de control de fármacos

Hasta un treinta por ciento de los medicamentos que se usan en los países en vías de desarrollo adolecen de mala calidad, ya sea por una fabricación defectuosa, por el deterioro producido por el paso del tiempo, debido a un mal almacenamiento o por tratarse de falsificaciones. Un fármaco en mal estado puede causar graves efectos secundarios e incluso la muerte. Sin embargo, identificarlos no resulta fácil. Numerosos países carecen de regulaciones o no practican inspecciones con frecuencia. Y los equipos de análisis, que solo proporcionan una información parcial sobre la composición del fármaco, pueden resultar escasos, costosos y difíciles de manejar, así como requerir una extensa formación por parte del usuario.

Un dispositivo portátil ideado en la Universidad de Boston, PharmaCheck, puede que aporte una solución económica e informativa al problema. Del tamaño de una caja de herramientas, el instrumento no solo indica la concentración de principios activos, sino también la velocidad a la que se liberan. Según Muhammad Zaman, ingeniero biomédico y director de la investigación, la capacidad de determinar esta «tasa de disolución» marca una verdadera diferencia entre PharmaCheck y otras técnicas, ya que si un ingrediente activo se descompone demasiado rápido, puede provocar una sobredosis letal.

Para utilizar PharmaCheck el usuario debe disolver una píldora en unos decilitros de agua. Allí añadirá una segunda solución, llamada sonda fluorescente, que ha sido diseñada para unirse al principio activo de un fármaco o un grupo de ellos. La medicina disuelta y la sonda reaccionan a lo largo de minúsculos canales grabados en un chip de silicio y polímero. Un sensor detecta la luz fluorescente emitida por la sonda y, al final, un programa traduce la lectura del sensor en una concentración estimada de la sustancia activa. Medir cómo evoluciona esa señal con el paso del tiempo permite calcular la tasa de disolución del compuesto. En cuestión de minutos, un médico, un regulador oficial o un trabajador sanitario sabrá a ciencia cierta si una pastilla es segura o no.

Zaman ensaya ahora prototipos en Ghana e Indone-

sia con la ayuda del programa internacional Promoting the Quality of Medicines. Hasta ahora, su equipo ha preparado tres sondas específicas para fármacos contra la malaria y antibióticos, que pertenecen al grupo de medicamentos de mala calidad más corrientes. En el futuro planean diseñar sondas para fármacos uterotónicos (inductores del parto), antituberculosos y anti-VIH. Cada principio activo requiere su propia sonda, por lo que PharmaCheck solo puede comprobar una a la vez. No es posible detectar directamente sustancias no deseadas, como adulterantes baratos. Sin embargo, dado que las impurezas suelen modificar el proceso de descomposición del principio activo, el laboratorio portátil podría registrar la existencia de una anomalía.

PharmaCheck proporciona un buen ejemplo de los grandes avances que ha experimentado la microfluídica, la técnica de manipulación de líquidos en canales con un diámetro inferior al milímetro. «Algo así hubiera sido impensable hace solo diez años», señala Zaman. En el futuro, estos pequeños «laboratorios en microchips» tal vez comprueben la calidad de suplementos dietéticos y medicamentos veterinarios o examinen con rapidez muestras de sangre y saliva.

Se han desarrollado otros métodos para identificar fármacos defectuosos. Un grupo de químicos de la Universidad de Notre Dame ha creado tarjetas de papel que, al humedecerlas y restregarlas con una píldora aplastada, producen una variedad de colores que informan sobre su contenido.

Si estas pruebas estuviesen a disposición de pequeñas empresas farmacéuticas, farmacias, hospitales, profesionales sanitarios y reguladores, sería posible evaluar la calidad de un medicamento en cada etapa del proceso de producción. Además, las mismas medidas podrían contribuir a frenar la entrada de genéricos de mala calidad en los países en desarrollo, así como reducir la venta por Internet de falsificaciones de fármacos muy exitosos, como Viagra.

—*Daisy Yuhas*

ELECTRÓNICA

Pantallas flexibles

Ciertas pantallas fabricadas con LED de polímeros resultan tan ligeras y flexibles como el papel plástico de cocina

Los expertos llevan años intentando desarrollar pantallas electrónicas flexibles, un avance que permitiría fabricar tabletas electrónicas enrollables y ropa con pantallas de vídeo elásticas incorporadas en la tela. El gran problema siempre ha sido encontrar un sustrato ultrafino maleable sobre el que construir la pantalla. Los LED de polímeros (PLED, una variedad de los diodos emisores de luz orgánicos que está comenzando a usarse para fabricar televisores muy delgados y extraordinariamente caros) pueden plegarse y apenas miden unos micrómetros de grosor. Hasta ahora, sin embargo, debían fabricarse sobre un sustrato de plástico o vidrio no muy flexible y entre 1000 y 10.000 veces más grueso que el propio PLED.

Ahora, gracias a una nueva técnica de fabricación que permite extraer la pantalla del sustrato como si fuese la capa adhesiva de una pegatina, una colaboración internacional ha obtenido PLED de dos micrometros de espesor: varias veces más finos que las películas de plástico transparente que usamos para envolver los alimentos.

Para lograrlo, los investigadores aplican primero una película de mylar de 1,4 micrómetros de grosor sobre un soporte rígido de vidrio. Las láminas de mylar (un poliéster) se asemejan al plástico extraíble que llevan de serie la mayoría de los teléfonos y tabletas actuales. Matthew White, experto en ciencia de materiales de la Universidad Johannes Kepler de Linz, explica que ese método les permite despegar el dispositivo una vez fabricado.

Después de colocar la lámina de mylar, los investigadores depositan sobre ella el PLED. Estos diodos constan de tres capas: un electrodo metálico de 100 nanómetros, uno transparente de 200 nanómetros y una capa fotoemisora de entre 225 y 330 nanómetros situada en el medio. Cuando todos los elementos se encuentran sobre el mylar, el conjunto puede despegarse del vidrio igual que si fuera una pegatina. La pantalla resultante es tan ligera y flexible como la película plástica que usamos en la cocina. Depositar los componentes del PLED sobre un sustrato delgado los convierte en una pantalla elástica que, en teoría, puede estirarse tanto como permita la capa base.

El pasado verano los investigadores fabricaron dos pantallas plegables de ocho píxeles, una de luz roja y otra de luz naranja. Cada píxel medía tres por seis milímetros, un tamaño muy superior al de los píxeles de las pantallas de alta definición actuales. Los PLED, sin embargo, alcanzan casi la misma calidad de brillo que los de una pantalla corriente y los expertos confían en que podrán miniaturizarlos sin problemas.

Aún deberán salvarse varios obstáculos antes de que las pantallas flexibles lleguen al mercado. El principal problema radica en que los electrodos metálicos se degradan en contacto con el aire, por lo que se oscurecen al cabo de pocas horas. Así pues, los expertos deberán desarrollar primero nuevos materiales. El rendimiento energético de las pantallas tampoco es óptimo, pero White y su equipo confían en que podrán mejorarlo hasta niveles normales.

—*Charles Q. Choi*

MEDICINA

Antisépticos contra la mortalidad neonatal

Cuando nace un niño en el Nepal rural, suele atarse una hebra de algodón en rama alrededor de su cordón umbilical seccionado. En numerosas culturas, el muñón del cordón se frota además con ceniza, aceite, mantequilla, especias, lodo o incluso estiércol. En el mundo en desarrollo hay comadronas que no se lavan las manos y cortan el cordón con cuchillos, tijeras, navajas de afeitar o cristales rotos sin haberlos limpiado. Los cordones recién seccionados constituyen un medio de cultivo atrayente para las bac-



terias, por lo que tales prácticas encierran un gran riesgo de infecciones en los neonatos de aquellos países.

Durante mucho tiempo se ha mantenido la norma médica de dejar el muñón del cordón sin tratar y esperar a que se desprenda por sí solo, lo que ha dado buen resultado en el ambiente estéril de los hospitales modernos. En los países en desarrollo, sin embargo, los médicos empiezan a cuestionarse esa recomendación. Si en vez de ello, el ombligo se tratara con clorhexidina, un antiséptico nada caro y fácil de obtener, se podrían salvar 500.000 vidas de recién nacidos al año.

La clorhexidina, utilizada durante años en intervenciones quirúrgicas, es eficaz, segura, de fácil aplicación y no necesita refrigeración. Funciona mejor que el lavado con agua y jabón, y es menos áspera que otros antisépticos. Tiene un precio asequible: un tubo de un solo uso cuesta unos pocos céntimos.

En 2002, Luke Mullany, investigador en salud pública de la Universidad Johns Hopkins, y sus colaboradores iniciaron unas pruebas de campo en Nepal para determinar si el empleo de este antiséptico reduciría la mortalidad neonatal. Los resultados fueron claros: una aplicación en el muñón del cordón en los primeros días hacía descender el riesgo de muerte en un 24 por ciento. Más tarde se calculó que si el uso de este fármaco se generalizara en los países pobres, sobre todo en los partos caseros y en los centros sanitarios con una elevada tasa de mortalidad, se evitaría uno de cada seis fallecimientos de recién nacidos. Los antisépticos podrían retrasar el desprendimiento del extremo del cordón, pero los estudios sostienen que ello no plantea riesgos apreciables.

En Nepal, donde la mayoría de los niños nacen en casa, los asistentes sanitarios de 41 de los 75 distritos del país reparten gratuitamente tubos de clorhexidina a las mujeres en los últimos meses del embarazo. Hasta ahora los gastos han sido sufragados por ONG occidentales, pero el Gobierno nepalí tiene previsto financiar el programa a partir de este mismo año y distribuir clorhexidina por todo el país en 2015. En Nigeria, Zanzíbar y Zambia se trabaja en programas piloto semejantes.

Durante los últimos años, los expertos han reclamado que la Organización Mundial de la Salud recomendara oficialmente el uso de este antiséptico durante la primera semana de vida del bebé en entornos domésticos, donde hay un alto riesgo de muerte. Asimismo, han señalado que la organización seguía promoviendo el «cuidado en seco» (dejar el cordón sin tratamiento) en hospitales y clínicas carentes de recursos. Por fin, en julio de 2013, incluyó la clorhexidina en su Lista Modelo de Medicamentos Esenciales, indicada específicamente para la limpieza del cordón umbilical.

—*Dina Fine Maron*

PARA SABER MÁS

Metagenomic profiling of microbial composition and antibiotic resistance determinants in puget sound. Jesse A. Port et al. en *PLOS ONE*, vol. 7, n.º 10, artículo nº e48000, 29 de octubre de 2012.

Reversibly assembled cellular composite materials. Kenneth C. Cheung y Neil Gershenfeld en *Science*, vol. 341, págs. 1219-1221, 13 de septiembre de 2013.

Página web de la nueva revista *Soft robotics:* **www.liebertpub.com/SoRo**

ASTROPARTÍCULAS

LA PRÓXIMA SUPERNOVA EN LA VÍA LÁCTEA

La explosión de una estrella masiva en nuestra galaxia podría ser inminente. La detección de los neutrinos emitidos durante la deflagración permitirá entender mejor que nunca la física de las supernovas y la naturaleza de estas partículas

Ray Jayawardhana

El 24 de febrero de 1987, a altas horas de la madrugada en la cima del cerro Las Campanas, en Chile, Ian Shelton decidió revelar la última placa fotográfica de la noche antes de irse a dormir. Contratado como observador por la Universidad de Toronto, Shelton había estado enfocando un pequeño telescopio de 10 pulgadas y varias décadas de antigüedad hacia la Gran Nube de Magallanes, una de las galaxias satélite de la Vía Láctea. Extrajo la placa del tanque de revelado y la examinó para asegurarse de que la exposición, de tres horas, había salido bien.

Entonces algo le llamó la atención: la imagen mostraba una curiosa mancha brillante cerca de la nebulosa de la Tarántula, conocida por su particular forma de araña. En un principio pensó que probablemente se tratase de un defecto en la placa. Para asegurarse, salió al aire seco de la montaña para contemplar el cielo con sus propios ojos. En la Gran Nube de Magallanes distinguió una estrella que no había visto la noche anterior. Shelton corrió hacia otra de las bóvedas de observación para dar la noticia.

Traducido y adaptado de Neutrino hunters: The thrilling chase for a ghostly particle to unlock the secrets of the universe *(«Cazadores de neutrinos: La emocionante persecución de una partícula fantasmal para descifrar los secretos del universo), de Ray Jayawardhana, por acuerdo entre Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, LLC.*

Mientras comentaba su desconcertante descubrimiento con Barry Madore y William Kunkel, dos de los astrónomos de la sala de control, el operador de telescopios chileno Oscar Duhalde intervino para explicar que él había visto la misma estrella unas horas antes, al salir para hacer un descanso. Al poco, los cuatro concluyeron que el «nuevo» astro tenía que ser una supernova, una estrella de gran tamaño que acababa de explotar. Cuando eso sucede, el astro puede llegar a brillar por un momento con la intensidad de mil millones de soles. Ningún objeto astronómico podía variar su luminosidad de manera tan drástica: de ser demasiado tenue para aparecer en las fotografías de la noche anterior, en pocas horas se había convertido en un punto reconocible a simple vista. Shelton y Duhalde habían descubierto una supernova en una de las galaxias satélites de la Vía Láctea. Horas más tarde, de manera independiente, un astrónomo aficionado observó lo mismo desde Nueva Zelanda.



ETA CARINAE, una descomunal estrella situada a unos 7500 años luz, explotará algún día y se convertirá en una brillante supernova. La humanidad ya tuvo ocasión de ver un anticipo: en 1843, el astro incrementó su brillo hasta superar por un momento al de todas las estrellas del cielo nocturno, excepto Sirio.

Antes de media mañana, numerosos científicos a lo largo y ancho del globo ya se habían enterado de la noticia por llamadas telefónicas de colegas exaltados y por un telegrama de la Unión Astronómica Internacional. Aquel regocijo se debía a que SN 1987A, como acabaría llamándose, era la primera supernova observada en nuestro vecindario galáctico desde la invención del telescopio, casi cuatro siglos antes.

Los astrónomos se apresuraron a estudiar el acontecimiento con una potente cohorte de telescopios ópticos, infrarrojos y radiotelescopios distribuidos por el hemisferio sur, así como con instrumentos de rayos X y radiación ultravioleta a bordo de naves espaciales. Fue un período de actividad frenética como pocos científicos han tenido oportunidad de experimentar. Un astrofísico entusiasmado lo expresó diciendo que era «como la Navidad».

Las investigaciones sobre SN 1987A brindaron un amplio respaldo a los modelos que, con la ayuda de complejas simulaciones en superordenadores, los teóricos habían estado desarrollando para describir la muerte de las estrellas masivas. Según dichos modelos, el núcleo del astro colapsa hasta formar una estrella de neutrones o un agujero negro; las capas exteriores, por su parte, son expulsadas hacia el exterior y forman una brillante nube de material estelar.

Pero los astrónomos no eran los únicos que tenían algo que celebrar. Para los físicos de partículas, las observaciones de SN 1987A aportaron pistas muy valiosas sobre la naturaleza de los neutrinos, partículas elementales muy conocidas por lo difíciles que resultan de detectar. Los estudios sobre SN 1987 han generado enormes expectativas ante la posibilidad de que una explosión semejante ocurra en nuestra propia galaxia: algo que podría suceder en cualquier momento y que ayudaría a esclarecer todo tipo de preguntas sobre la muerte de las estrellas masivas y la naturaleza de los neutrinos. Cuando ese momento llegue, los cazadores de neutrinos serán probablemente los primeros en enterarse.

ANTES QUE LA LUZ

Al difunto John Bahcall, astrofísico que por aquel entonces trabajaba en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, la supernova de 1987 llegó a quitarle el sueño. Tenía una buena razón para ello, pues sabía que los primeros mensajeros del cataclismo cósmico —y, posiblemente, los más importantes— tenían que haber llegado unas horas antes de que el acontecimiento se hiciese visible en los telescopios habituales. Según los modelos teóricos, el colapso del núcleo de una estrella masiva debía producir un copioso estallido de neutrinos. Dada su naturaleza, estos escaparían sin demasiados impedimentos del interior del astro. El destello luminoso solo se produciría más tarde, cuando explotase el manto exterior de la estrella.

Minutos después de conocer la existencia de SN 1987A, Bahcall y dos de sus colaboradores se pusieron manos a la obra para calcular cuántos neutrinos tendrían que haber sido registrados por los detectores terrestres. Determinaron que debía tratarse de unas pocas docenas. En menos de una semana, enviaron un artículo con sus conclusiones a la revista *Nature*, a fin de que su predicción se publicase antes que el análisis de los datos de los detectores.

Mientras tanto, los responsables de dichos experimentos ya habían comenzado a cribar sus datos. La mejor baza para detectar los neutrinos de una supernova la proporcionaba el detector Kamiokande, en Japón. Compuesto por un tanque cilíndrico de cuatro pisos de altura lleno de agua purificada, los mil tubos fotomultiplicadores que lo rodeaban habían sido diseñados para registrar el destello de luz que se produciría cada vez que un neutrino interaccionase con uno de los átomos del agua. Si los neutrinos emitidos por SN 1987A no se observaban, sería un indicador de que algo muy serio estaba fallando en los modelos de supernovas.

Al final, para alivio de muchos, la señal de los esperados neutrinos despuntó con claridad en los datos. En un intervalo de pocos segundos, Kamiokande había registrado once destellos unas tres horas antes de que los astrónomos de Chile y Nueva Zelanda avistasen las primeras señales ópticas. Al otro lado del mundo, en una mina de sal poco profunda bajo el lago Erie, cerca de Cleveland, un detector similar a Kamiokande había observado ocho destellos justo al mismo tiempo que el experimento japonés. Más adelante se comprobó que un tercer detector, situado en el Observatorio de Neutrinos de Baksan, en el Cáucaso ruso, que operaba con aceite en lugar de agua, había registrado cinco neutrinos.

Las dos docenas de partículas detectadas no constituían más que una ínfima parte de los miles y miles de millones de neutrinos que, procedentes de la explosión, habían atravesado nuestro planeta. Debido a que los tres experimentos mencionados se encontraban en el hemisferio norte (la Gran Nube de Magallanes brilla en el sur), aquellos neutrinos habían tenido que atravesar la Tierra de lado a lado y penetrar en los detectores desde abajo.

Puede que dos docenas de partículas no parezcan un botín muy cuantioso. Sin embargo, su importancia queda patente en los cientos de artículos científicos que, desde entonces, han analizado sus propiedades. La supernova 1987A brindó la primera oportunidad de detectar neutrinos procedentes de una fuente



Ray Jayawardhana trabaja en la Universidad de Toronto, donde investiga el origen de los sistemas planetarios y la formación de estrellas y enanas marrones. Es autor del libro *Strange new worlds: The search for alien planets and life beyond our solar system* («Nuevos mundos extraños: La búsqueda de exoplanetas y de vida más allá de nuestro sistema solar», Princeton University Press, 2011).

EN SÍNTESIS

Durante la explosión de una supernova no solo se emiten enormes cantidades de luz, sino también multitud de neutrinos. Aunque muy difíciles de detectar, estas partículas aportan información de gran valor sobre el proceso.

La última supernova que estalló en las inmediaciones de la Vía Láctea lo hizo en 1987. Entonces se detectaron dos docenas de neutrinos. A pesar de su reducido número, su estudio resultó clave para entender la explosión.

La próxima supernova cercana podría estallar en cualquier momento. Cuando ocurra, los físicos esperan detectar miles o incluso millones de neutrinos, lo que permitirá estudiar a fondo las supernovas y la naturaleza de estas partículas.



SUPER-KAMIOKANDE, un observatorio de neutrinos emplazado en las profundidades de una mina japonesa, emplea como sustancia de detección 50.000 toneladas de agua. De la vorágine de neutrinos que atraviesa la Tierra en cada instante, de vez en cuando alguno de ellos choca con una de las moléculas de agua del detector. En el proceso se generan nuevas partículas y un destello de luz.

CORTESÍA DEL OBSERVATORIO DE KAMIOKA, INSTITUTO PARA LA INVESTIGACIÓN DE RAYOS CÓSMICOS Y UNIVERSIDAD DE TOKIO

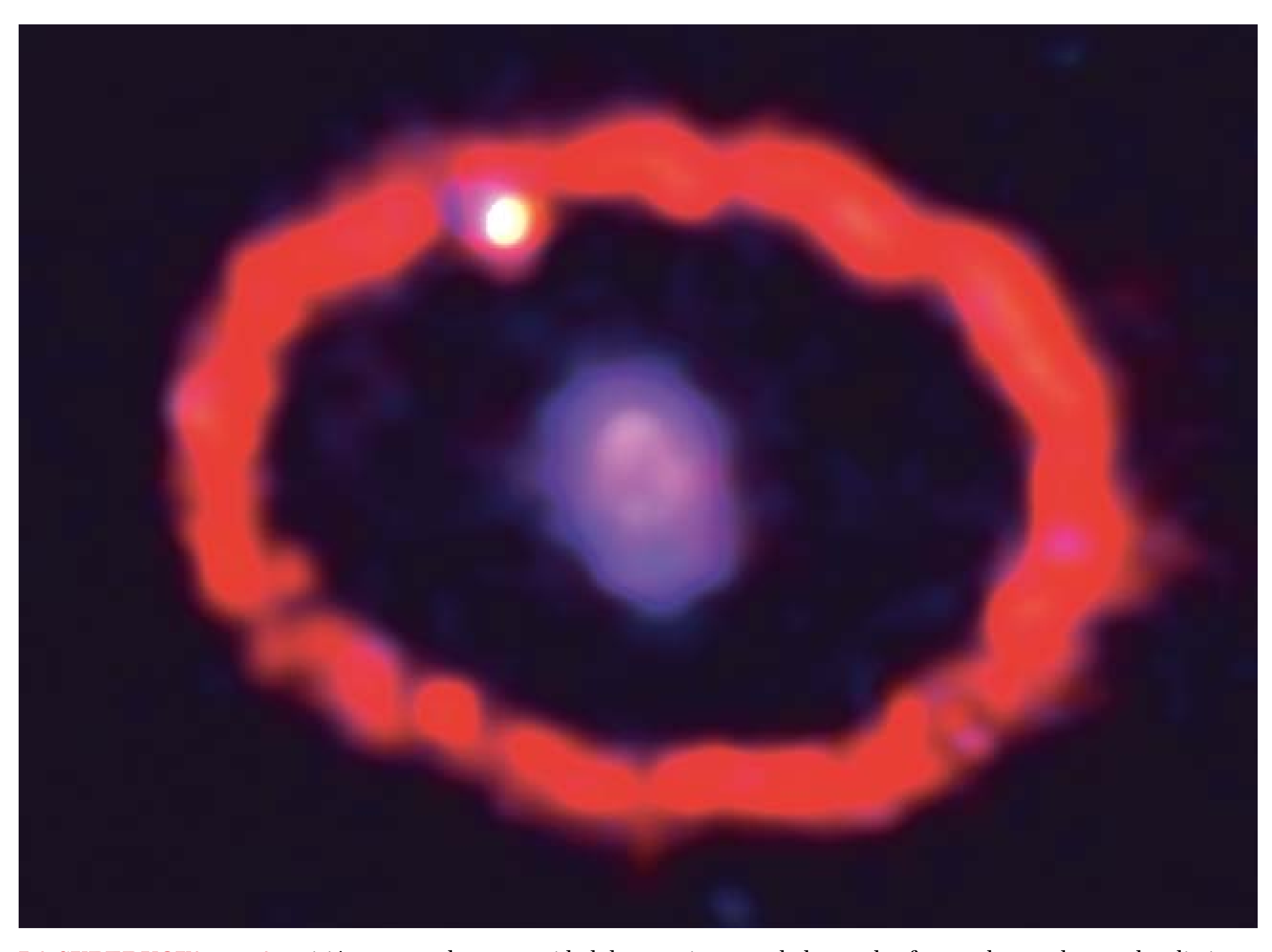
astronómica distinta del Sol. Según John Beacom, físico teórico de la Universidad de Ohio: «Los neutrinos nos permiten contemplar el interior de una estrella masiva en los instantes finales de su vida; gracias a ellos, podemos efectuar observaciones astrofísicas que serían imposibles de realizar con otros medios».

A pesar del reducido número de neutrinos detectados, estos bastaron para validar algunas de las hipótesis clave que se venían empleando para describir las explosiones de supernova. Para los astrofísicos, supuso una satisfacción comprobar que el número y la energía de los neutrinos corroboraban sus expectativas teóricas. Gracias a la excelente coincidencia entre modelos y observaciones, los investigadores pudieron concluir que la supernova no había perdido energía a través de procesos exóticos (como la emisión por parte de los neutrinos de ciertas partículas hipotéticas llamadas axiones, o como consecuencia de una posible fuga de neutrinos hacia dimensiones ocultas del espaciotiempo). Por otro lado, el hecho de que los neutrinos hubiesen llegado distribuidos en un intervalo de varios segundos, y no en una ráfaga muy concentrada, confirmaba que habían tardado algún tiempo en escapar del núcleo ultradenso de la estrella, tal y como predecían los modelos.

Pero, además, las mediciones aportaron varias pistas sobre la naturaleza de los propios neutrinos. Dado que habían llegado a la Tierra solo tres horas antes que las primeras señales luminosas de la explosión, tenían que haber viajado a una velocidad muy próxima a la de la luz. En general, las partículas se desplazan tanto más rápido cuanto más ligeras son; así pues, la hora de llegada de los neutrinos estaba confirmando que la masa de tales partículas debía ser ínfima. A su vez, ello condujo a los científicos a concluir que, a pesar de que abundan en el universo en cantidades prodigiosas, los neutrinos difícilmente podían ser los constituyentes de la materia oscura (la misteriosa sustancia que conforma el 85 por ciento de la masa del cosmos, pero cuya naturaleza los físicos desconocen por completo). Años más tarde, cuando en 2011 un experimento desató un frenesí mediático sobre la posibilidad de que los neutrinos viajasen más rápido que la luz, uno de los argumentos más sólidos en contra provenía de las observaciones de SN 1987A. Si los neutrinos de aquella explosión hubiesen viajado a la velocidad que se sugería, no habrían llegado a la Tierra tres horas antes que los fotones, sino con varios años de antelación.

PREPARADOS PARA LA EXPLOSIÓN

La supernova de 1987 abrió el apetito de los astrofísicos por profundizar en los mecanismos internos de las estrellas moribundas. «Imagine lo que aprenderíamos si detectásemos mil neutrinos procedentes de una supernova cercana», reflexiona Alex Friedland, del Laboratorio Nacional de Los Álamos. Un suceso tan extraordinario permitiría determinar no solo la secuencia de acontecimientos durante la explosión, sino también el des-



LA SUPERNOVA 1987A emitió una asombrosa cantidad de neutrinos, 24 de los cuales fueron detectados por los distintos experimentos. A mediados de los años noventa, el material eyectado durante la explosión chocó (*blanco*) con un anillo gigante de gas (*rojo*) que se había desprendido de la estrella 20.000 años antes.

tino del desafortunado astro. También los físicos de partículas muestran su interés por los neutrinos de supernovas, pues brindan una oportunidad única para entender el comportamiento de estas esquivas partículas en condiciones extremas, imposibles de reproducir en un laboratorio.

Lo que ambos grupos de científicos necesitan para lograr sus objetivos es una supernova producida por el colapso del núcleo de una estrella masiva en la Vía Láctea. Por extraño que parezca, nadie ha visto estallar una supernova en nuestra galaxia desde 1604, año en que varios astrónomos, Johannes Kepler entre ellos, se percataron de la existencia de una «nueva estrella» en la constelación de Ofiuco. En el momento de máxima luminosidad, el astro incluso llegó a verse a plena luz del día. Apenas tres décadas antes, en 1572, Tycho Brahe y otros astrónomos europeos habían observado otra supernova. Los datos disponibles hoy en día sugieren que ninguna de esas dos explosiones se produjo por el colapso del núcleo de una estrella masiva. En su lugar, el objeto que estalló habría sido una enana blanca: un remanente estelar que, o bien engulló demasiado material de una estrella compañera, o bien se fusionó con otra enana blanca.

A partir de las observaciones de otras galaxias, los astrónomos estiman que en la Vía Láctea tal vez exploten varias estrellas masivas cada siglo. La mayoría de las veces, sin embargo, el gas y el polvo que llenan el disco galáctico ahogan su luz y no permiten que esta llegue a la Tierra. Pero el material interestelar no puede bloquear los neutrinos, por lo que la detección de una ráfaga súbita de estas partículas estaría delatando la explosión de una supernova en algún lugar de la Vía Láctea. Los grandes detectores de neutrinos existen desde hace un cuarto de siglo; de modo que, si las estimaciones son correctas, las señales de una supernova galáctica podrían aparecer en cualquier momento. «Sería una oportunidad única en la vida, por lo que es mejor estar preparados», sentencia Georg Raffelt, del Instituto Max Planck de Física de Múnich.

Kate Scholberg, de la Universidad Duke, coincide con él. Junto con otros colaboradores, Scholberg ha puesto en marcha el Sistema de Alerta Temprana de Supernovas (SNEWS, por sus siglas en inglés), una red coordinada para proporcionar notificaciones rápidas de las explosiones de supernova por colapso de núcleo que pudieran tener lugar en nuestra galaxia. Con ello, se busca que todos los experimentos del mundo dotados de la sensibilidad necesaria (como IceCube, en la Antártida; LVD y Borexino, en Italia; o Super-Kamiokande, el sucesor de Kamiokande) informen de las posibles explosiones a un ordenador central situado en el Laboratorio Nacional de Brookhaven. «Si varios detectores se activasen a la vez, habría grandes probabilidades de que se tratase de una supernova cercana», explica Scholberg.

Si el ordenador de SNEWS encontrase una coincidencia entre las señales de dos detectores en un intervalo de unos diez segundos, enviaría una alerta a los observatorios de todo el mundo. Los investigadores esperan que los telescopios terrestres y los espaciales también registren huellas electromagnéticas de la explosión, como luz visible, ondas de radio y rayos X. «La idea es que haya el máximo número de personas observando en todos lo sitios, a fin de aumentar las posibilidades de detectar la luz temprana», explica Scholberg.

«Observar neutrinos procedentes de una supernova en nuestra galaxia supondría una mina de información increíble», enfatiza la investigadora. Los detectores registrarán la evolución temporal de la cantidad de neutrinos que les lleguen, así como su energía, gracias a lo cual podrán reconstruir el desarrollo de la explosión. Entre otras cuestiones, podrán también determinar si el núcleo de la estrella colapsa hasta formar un agujero negro (un objeto del que nada, ni siquiera los neutrinos, puede escapar) o si el proceso se detiene algo antes, dejando tras de sí una estrella de neutrones. Si se formase un agujero negro, el flujo de neutrinos se interrumpiría de manera drástica. En cambio, si el producto final fuese una estrella de neutrones, el remanente estelar seguiría emitiendo neutrinos durante unos 10 segundos a medida que se enfría, por lo que la corriente de partículas decaería con suavidad.

Una supernova galáctica también ayudaría a esclarecer algunas cuestiones relativas a la naturaleza de los neutrinos. Hasta ahora, los físicos han tenido problemas para determinar lo que llaman su «jerarquía de masas». Desean saber si, de los tres estados de masa que caracterizan a los neutrinos, existen dos pesados y uno ligero, o bien uno pesado y dos ligeros (todos ellos, en cualquier caso, tienen asociada una masa diminuta en comparación con la del resto de las partículas elementales). Los investigadores creen que los neutrinos procedentes de una supernova podrían ayudarles a dar con la respuesta. Más aún: en condiciones ordinarias, los neutrinos apenas interaccionan entre sí; sin embargo, en el núcleo de una supernova, la densidad de estas partículas es tan elevada que tal vez sus interacciones mutuas alteren su comportamiento. Según Scholberg: «Tal vez viésemos exóticas oscilaciones colectivas de neutrinos. Cualquier anomalía podría constituir signos de física más allá del modelo estándar», la exitosa teoría que los investigadores emplean desde hace años para describir las partículas elementales y sus interacciones.

Por fortuna, varios de los detectores operativos hoy en día poseen la sensibilidad necesaria para registrar los neutrinos de una supernova que estallase en cualquier rincón de la Vía Láctea. Si la explosión se produjese cerca del centro galáctico, a más de 25.000 años luz de distancia, Super-Kamiokande detectaría varios miles de impactos. Podría incluso determinar su dirección de procedencia con una precisión correspondiente a una porción de cielo pocas veces mayor que el disco lunar. IceCube, por su parte, registraría un millón de eventos, algo idóneo para estudiar la evolución temporal del flujo de neutrinos: «Seremos capaces de observar los diez segundos que viene a durar la explosión con instantáneas tomadas cada pocos milisegundos», explica Francis Halzen, de la Universidad de Wisconsin-Madison e investigador principal de IceCube. «También podremos determinar el momento exacto en que se forma la estrella de neutrones», asegura.

Sin embargo, en lo que respecta al estudio de las explosiones de supernova, los experimentos actuales están especializados en la detección de neutrinos de un solo tipo: antineutrinos electrónicos (existen tres especies, o «sabores», de neutrinos: electrónicos, muónicos y tauónicos, cada uno de los cuales posee un homólogo de antimateria). «Observar un único sabor es como hacer una fotografía con un filtro que solo deja pasar un color», apunta Scholberg. Como primer paso para obtener imágenes «policromáticas», la investigadora y sus colaboradores canadienses están desarrollando el Observatorio de Helio y Plomo (HALO, por sus siglas en inglés), en el SNOLAB de Ontario. Con 80 toneladas de plomo como material detector, el instrumento será sensible a la llegada de neutrinos electrónicos, por lo que servirá de complemento a las instalaciones que registran la llegada de sus gemelos de antimateria. Como detector de neutrinos, HALO es bastante pequeño, de modo que solo podrá observar aquellas supernovas que estallen en la mitad de la galaxia más próxima a nosotros.

A LA ESPERA

Por emocionantes que se antojen todas las perspectivas, para llevarlas a cabo habrá que aguardar a que una supernova por colapso del núcleo explote en nuestro vecindario galáctico. Pero la espera resulta frustrante. Según Beacom, se trata de «contener la respiración». El problema radica en que los observatorios actuales no poseen la sensibilidad necesaria para detectar la mayoría de los neutrinos procedentes de supernovas de otras galaxias. Si estallase una en Andrómeda, por ejemplo (la galaxia similar a la Vía Láctea más cercana a nosotros, situada a 2,5 millones de años luz de distancia), Super-Kamiokande solo registraría un suceso.

Aunque todos los indicios disponibles sugieren que viejas estrellas gigantes, como Betelgeuse y Eta Carinae, sufrirán un final explosivo en algún momento del futuro próximo, ignoramos cuándo sucederá. En términos cósmicos, «futuro próximo» bien puede significar cientos de miles de años. No obstante, la probabilidad de que en unos decenios explote una estrella masiva en algún lugar de nuestra galaxia sí puede considerarse elevada. Friedland me comentó en cierta ocasión que, si se viera obligado a apostar sobre qué ocurrirá antes, la próxima supernova galáctica o la construcción un gran colisionador de partículas en EE.UU., se decantaría por la supernova. Aunque esta explotase tan lejos que el polvoriento velo de la Vía Láctea nos tapase su luz, el cataclismo aún podría apreciarse con claridad en los grandes detectores de neutrinos del mundo. Será un acontecimiento sensacional; un punto de inflexión que nadie celebrará tanto como los cazadores de neutrinos.

PARA SABER MÁS

Neutrinos from the recent LMC supernova. J. N. Bahcall, A. Dar y T. Piran en *Nature*, vol. 326, págs. 135-136, 12 de marzo de 1987.

Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A. K. Hirata et al. en *Physical Review Letters*, vol. 58, n.º 14, págs. 1490-1493, 6 de abril de 1987.

EN NUESTRO ARCHIVO

Supernovas. Wolfgang Hillebrandt, Hans-Thomas Janka y Ewald Müller en *IyC*, diciembre de 2006.

Neutrinos para observar el cosmos. Graciela B. Gelmini, Alexander Kusenko y Thomas J. Weiler en *IyC*, julio de 2010.

IceCube: Astrofísica desde el hielo. Carlos Pérez de los Heros en *IyC*, marzo de 2013.

Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod en *IyC*, junio de 2013.

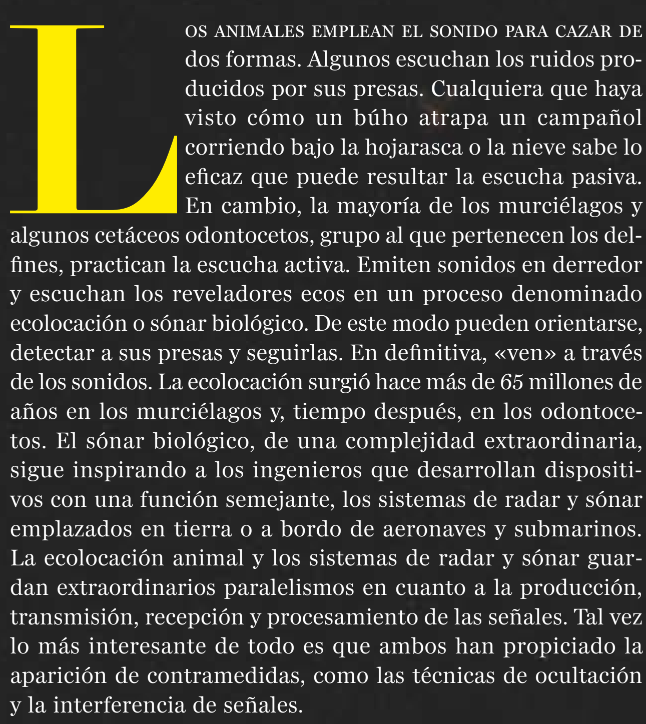
BIOFÍSICA

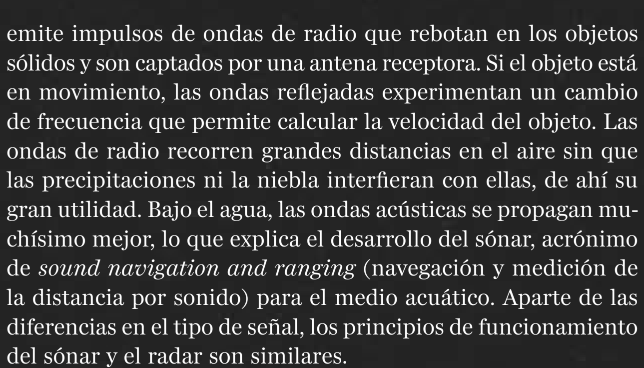
La batalla evolutiva acústica



Los murciélagos y otros animales utilizan las ondas sonoras como herramienta de caza, pero sus presas han elaborado estratagemas para eludir la detección

William E. Conner





Los animales emplean el sonido para cazar de dos formas. Algunos escuchan los ruidos producidos por sus presas. Cualquiera que haya visto cómo un búho atrapa un campañol corriendo bajo la hojarasca o la nieve sabe lo eficaz que puede resultar la escucha pasiva. En cambio, la mayoría de los murciélagos y algunos cetáceos odontocetos, grupo al que pertenecen los delfines, practican la escucha activa. Emiten sonidos en derredor y escuchan los reveladores ecos en un proceso denominado ecolocación o sónar biológico. De este modo pueden orientarse, detectar a sus presas y seguirlas. En definitiva, «ven» a través de los sonidos. La ecolocación surgió hace más de 65 millones de años en los murciélagos y, tiempo después, en los odontocetos. El sónar biológico, de una complejidad extraordinaria, sigue inspirando a los ingenieros que desarrollan dispositivos con una función semejante, los sistemas de radar y sónar emplazados en tierra o a bordo de aeronaves y submarinos. La ecolocación animal y los sistemas de radar y sónar guardan extraordinarios paralelismos en cuanto a la producción, transmisión, recepción y procesamiento de las señales. Tal vez lo más interesante de todo es que ambos han propiciado la aparición de contramedidas, como las técnicas de ocultación y la interferencia de señales.

El radar, en su origen acrónimo del inglés *radio detection and ranging* (detección y medición de la distancia por radio), emite impulsos de ondas de radio que rebotan en los objetos sólidos y son captados por una antena receptora. Si el objeto está en movimiento, las ondas reflejadas experimentan un cambio de frecuencia que permite calcular la velocidad del objeto. Las ondas de radio recorren grandes distancias en el aire sin que las precipitaciones ni la niebla interfieran con ellas, de ahí su gran utilidad. Bajo el agua, las ondas acústicas se propagan muchísimo mejor, lo que explica el desarrollo del sónar, acrónimo de *sound navigation and ranging* (navegación y medición de la distancia por sonido) para el medio acuático. Aparte de las diferencias en el tipo de señal, los principios de funcionamiento del sónar y el radar son similares.

En su libro publicado en 2007, *Blip, ping and buzz: Making sense of radar and sonar*, el físico Mark Denny quiso comparar las técnicas de teledetección del hombre y los animales. Según el autor, la historia del radar está tachonada de nombres célebres, como los del inventor Nikola Tesla y el ingeniero Guillermo Marconi, que realizó la primera transmisión de radio transatlántica. El relato incluye otros personajes no tan conocidos, los numerosos padres del radar. La creación de los primeros sistemas operativos de radar experimentó un impulso decisivo ante la inminencia de la Segunda Guerra Mundial. El primero de tales sistemas fue la red de estaciones de radar de la *Chain Home* (cadena metropolitana), desplegada a lo largo de la costa meridional y oriental de Inglaterra. Erigida como un sistema de alerta previa para la fuerza aérea británica, alertaba

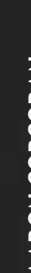
LOS MURCIÉLAGOS son diestros cazadores que emplean el sónar para conseguir alimento. Este murciélago orejudo de Townsend (*Corynorhinus townsendii*) persigue a una polilla (*Bertholdia trigona*) que emite sus propios sonidos para perturbar las señales acústicas de su perseguidor. Ambos son contendientes en una carrera armamentística evolutiva.

EN SÍNTESIS

Algunos animales se sirven de la ecolocación para orientarse y cazar a sus presas. Emiten sonidos en derredor y escuchan los reveladores ecos que les informan sobre variaciones del entorno y la ubicación de objetos.

Los sistemas de radar y sónar guardan un extraordinario parecido con la ecolocación animal. A menudo, el desarrollo de los sistemas artificiales se ha basado en la observación de los biológicos.

Ambos han propiciado la aparición de contramedidas en la parte opuesta, como las técnicas de ocultación y la interferencia de señales, que a su vez han favorecido la creación de nuevas estrategias más complejas de detección.



de la concentración de bombarderos alemanes sobre los cielos de Francia, lo que permitía a los aviones de caza *Spitfire* y *Hurricane* despegar con antelación y aguardar a las oleadas enemigas desde una ventajosa posición a gran altitud.

La invención del sónar precede en treinta años a la del radar. Como en el caso anterior, constituyó la respuesta tecnológica a otra arma de guerra: los submarinos de la Primera Guerra Mundial. Los primeros modelos eran aparatos de escucha pasiva compuestos por micrófonos subacuáticos (hidrófonos) y se habían desarrollado para los navíos alemanes, como el crucero pesado *Prinz Eugen*. No solo detectaban el zumbido de los torpedos cercanos, sino también el de buques alejados, blancos potenciales. El hundimiento del *Titanic* aceleró, asimismo, su desarrollo, puesto que el sónar podía localizar los icebergs ocultos en la oscuridad o la niebla. Los años de entreguerras presenciaron la aparición de la escucha activa, el verdadero sónar, de tal modo que al estallar la Segunda Guerra Mundial el grueso de las armadas de Estados Unidos y Gran Bretaña contaba con sónar antisubmarino.

Con frecuencia, los investigadores dedicados al estudio del sónar biológico intercambiaron ideas con los diseñadores de las versiones artificiales. Sir Hiram Maxim, prolífico inventor de inicios del siglo xx, propuso un sistema inspirado en los murciélagos para prevenir las colisiones marítimas en alta mar. Por desgracia, los rudimentarios conocimientos acerca de la ecolocación de la época le impidieron fabricar un modelo operativo. Maxim creía que los murciélagos se orientaban mediante señales de baja frecuencia generadas por el batido de las alas. George Washington Pierce, quien trabajó en el Laboratorio de guerra antisubmarina de la Armada de EE.UU. en Nueva Londres, Connecticut, tras solicitar una excedencia en el departamento de física de la Universidad Harvard, ayudó después al zoólogo de Harvard Donald Griffin a descubrir la verdadera naturaleza de la ecolocación en los quirópteros. Pierce inventó un micrófono con materiales piezoeléctricos (que desprenden electricidad cuando son sometidos a una tensión mecánica), el cual le permitió escuchar por primera vez las vocalizaciones ultrasónicas de los murciélagos, la base de su sistema de ecolocación.

PRODUCCIÓN DE SEÑALES

Tanto en el radar como en el sónar, ya sea en su versión natural o artificial, todo comienza con la emisión de una señal dividida en impulsos. La ley fundamental de la transmisión de señales dicta que la longitud de onda de la señal es proporcional al tamaño de la estructura emisora. Los primeros radares se construyeron con el fin de detectar objetos muy alejados, por lo que operaban en una longitud de onda de 12 metros, de ahí el enorme tamaño del transmisor. Cada una de las estaciones de la *Chain Home* consistía en cuatro torres de 110 metros de altura distanciadas 55 metros entre sí y unidas por un entramado de cables de acero imantados que generaba la señal de emisión. Las cuerdas vocales de un murciélago, en cambio, son diminutas y generan ondas sonoras de longitudes de onda muy cortas.

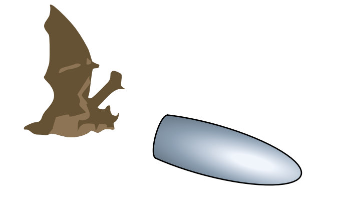
También resulta importante una segunda relación: cuanto menor es la longitud de onda, mayor es la resolución. Las longitudes de onda largas permiten detectar con precisión objetos voluminosos, como buques en el mar, pero son menos precisas con blancos más pequeños. Por esta razón, los radares primitivos reconocían con dificultad el número de aeroplanos; solo podían alertar de su aproximación. Con su sónar de onda corta, los murciélagos identifican objetos tan diminutos como los mosquitos, abejas, escarabajos y polillas que devoran. Jim Simmons, de la Universidad Brown, ha obtenido pruebas de que pueden distinguir detalles de dimensiones micrométricas, lo que les permitiría incluso percibir la textura de la superficie de sus presas.

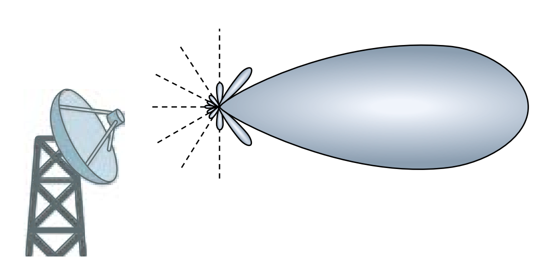
El radar está compuesto por un conjunto de transmisores que emiten señales en forma de haz, muy similar al rayo de una linterna. Los haces estrechos son los más adecuados, ya que concentran la potencia en una dirección y detectan así objetos lejanos. También permiten deducir la dirección del blanco con mayor precisión. Los ingenieros de radar pueden regular la forma del haz manipulando la distancia entre los transmisores de la antena y la longitud total de la misma, algo que los animales también logran por medios distintos. Una reciente colaboración entre Rolf Müller, de la Universidad Politécnica de Virginia, Zhiwei Zhang, de la Universidad de Shandong en China, y Son Nguyen Truong, de la Academia Vietnamita de Ciencias, ha descubierto que los insólitos pliegues nasales del murciélago de herradura de Bourret le ayudan a generar un haz ultrasónico muy concentrado que mejora su capacidad para rastrear insectos.

Cabe imaginar situaciones en las que resulta útil regular de forma dinámica la anchura del haz, igual que es posible hacerlo en algunas linternas. Los haces finos son idóneos para localizar blancos remotos y determinar su rumbo, pero con los anchos se barre un área más amplia, aunque más cercana. Algunos odontocetos, en especial las belugas, y desde hace poco sabemos que también las orcas bastardas, ensanchan y reducen el haz de ecolocación deformando una lente acústica rellena de grasa situada en la frente, el melón. Un reciente estudio llevado a cabo por



William E. Conner es profesor de biología y ostenta la cátedra David y Lelia Farr de innovación, creatividad e iniciativa empresarial en la Universidad Wake Forest de Carolina del Norte, donde imparte clases de fisiología comparada, etología y bioinspiración y biomimética.





COMPARACIÓN DEL HAZ DE SÓNAR de un murciélago (*izquierda*) con el de un radar (*derecha*). La forma del haz es uno de los factores más influyentes en la eficacia de los aparatos de radar y sónar porque determina el alcance y la resolución del sistema. El murciélago controla de forma selectiva y dinámica esta forma; el radar muestra pequeños reflejos indeseados (lóbulos laterales).

SIGMA XI

Lasse Jakobsen, John Ratcliffe y Annemarie Surlykke, de la empresa Sound Communication Group, adscrita a la Universidad del Sur de Dinamarca, ha demostrado que los murciélagos modifican su imagen de sónar de manera adaptativa. Al abrir la boca de par en par y aumentar la frecuencia de las vocalizaciones consiguen emitir un haz fino para rastrear a distancia, mientras que a la inversa proyectan un haz más ancho que abarca una franja más extensa.

Tanto los ingenieros como los animales han descubierto otras mañas del oficio. Han visto, así, que la emisión de una señal compuesta por varias frecuencias reporta notables ventajas. El denominado chillido de banda ancha puede multiplicar por dos órdenes de magnitud la resolución de distancia de un sistema. El distintivo barrido decreciente de frecuencias en un murciélago de frecuencia modulada logra a la perfección esa resolución de distancia. Tales murciélagos cazan en entornos complejos, ya que capturan sus presas entre las ramas de los árboles, sobre los arbustos o incluso a flor de agua. Otros murciélagos emiten una señal de frecuencia constante, más larga. Este tipo de señal permite utilizar el efecto Doppler para medir la velocidad relativa de la presa. Igual que un observador oye cómo el silbido de un tren que se acerca se vuelve más agudo, el murciélago percibe la mayor frecuencia del eco reflejado por una polilla que vuela hacia él.



LOS MURCIÉLAGOS DE HERRADURA, O RINOLOFOS, emiten señales acústicas a través del hocico. El murciélago de herradura de Bourret (*derecha*) posee excrecencias carnosas muy pronunciadas en el rostro denominadas hojas nasales. Estas le permiten generar un haz de sónar muy concentrado en comparación con el de un murciélago de herradura corriente (*izquierda*), lo que mejora notablemente su capacidad para detectar insectos.

Antaño los murciélagos se clasificaban en función de la frecuencia de sus vocalizaciones (modulada o constante), pero después se ha visto que la cuestión resulta más compleja. Algunas especies combinan ambas estrategias con maestría: transmiten señales de banda estrecha para detectar las presas en la distancia y emiten señales de frecuencia modulada (banda ancha) cuando se acercan a ellas, momento en que la resolución de la distancia se torna crucial para la captura.

DISTANCIAS DE PROPAGACIÓN

Las propiedades de transmisión del medio determinan si la radiación electromagnética (del radar) o las ondas sonoras dan lugar a una señal adecuada. La primera se propaga por el aire sin sufrir apenas atenuación o pérdida de potencia. El sonido se transmite peor en el aire y es más sensible a las variaciones del entorno, a causa del viento o la lluvia; además, depende de la longitud de onda (y de la frecuencia). Los infrasonidos (de frecuencias inferiores a 25 ciclos por segundo) llegan más lejos en el medio aéreo; los elefantes y otros grandes animales terrestres se sirven de ellas para la comunicación a larga distancia, con un alcance de unos dos kilómetros. En cambio, los ultrasonidos de los murciélagos (con frecuencias superiores a los 20.000 ciclos por segundo) son absorbidos con rapidez por las moléculas de aire, lo que limita su alcance efectivo a escasos metros.

Bajo el agua, el sonido es el rey: puede recorrer grandes distancias y solo se disipa a razón de un 1 por ciento por kilómetro. Gracias a esta virtud, las ballenas podrían comunicarse a través de la inmensidad de los mares. La comunicación subacuática a larga distancia se ve facilitada por la presencia de canales naturales de transmisión del sonido situados a varias profundidades: a medida que nos sumergimos, la velocidad del sonido varía debido a cambios de temperatura, salinidad y presión. Tales gradientes desvían las ondas sonoras y las concentran en profundidades específicas que conforman canales. En el océano existe una zona de convergencia a escasa profundidad que dirige los sonidos hacia la superficie, donde las ondas sonoras se concentran y rebotan, lo que posibilita la comunicación remota. En aguas más profundas existe un segundo canal, el SOFAR (de *sound fixing and ranging*) que atrapa los sonidos y los proyecta lateralmente, en lugar de radialmente. Ambos canales facilitan la transmisión del sonido porque la propagación en tres dimensiones queda limitada a dos planos. Las tripulaciones de los submarinos y los mamíferos marinos utilizan estos canales para aprovechar todo el potencial del sonido.

La radiación electromagnética se propaga bien a través del aire, pero el agua absorbe la mayoría de las longitudes de onda (el 99,99 por ciento por cada metro de agua), por lo que en el medio acuático casi no puede aprovecharse. La única excepción es la estrecha banda de longitudes de onda de 400 a 700 nanómetros, correspondiente a la luz visible, de la que se sirven los organismos acuáticos para la comunicación visual.

SEÑALES INCIDENTES

Los sensores del radar consisten en antenas dipolares (como la antena de cuernos de los viejos televisores) y los del sónar en hidrófonos piezoeléctricos. Los murciélagos poseen el órgano auditivo típico de los mamíferos, con un tímpano que el sonido transmitido por el aire hace vibrar y una cóclea llena de líquido que convierte las vibraciones mecánicas en el lenguaje eléctrico del sistema nervioso. Los huesecillos del oído medio, la cadena osicular, se ajustan a la impedancia de la señal incidente, una medida de la resistencia que una señal experimenta cuando intenta penetrar en un sistema. El ajuste mejora la transmisión de las vibraciones sonoras entre el aire

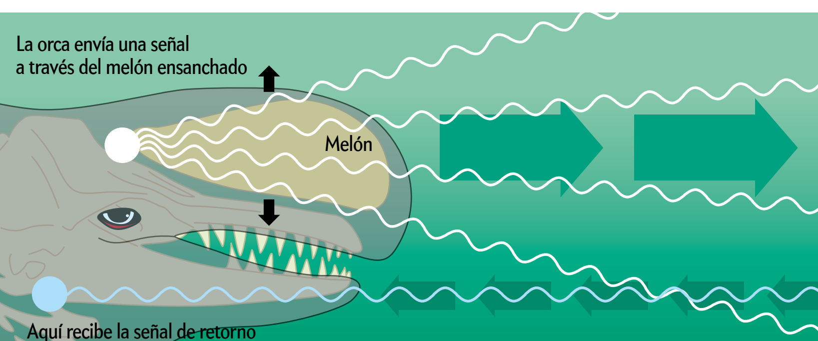
y el líquido de la cóclea. Las grandes orejas orientables son los rasgos más conspicuos del oído y actúan como reflectores parabólicos que encauzan el sonido hacia el canal auditivo. Aquí de nuevo impera la regla del tamaño: las dimensiones de las orejas de muchos quirópteros revelan la franja de frecuencias en la que operan. Las de tamaño reducido funcionan mejor con las altas frecuencias; las de gran tamaño, con bajas frecuencias. Los orejudos abundan entre los murciélagos planeadores, los cuales recurren a la escucha pasiva para descubrir a sus presas en el suelo o el agua, a las que capturan abatiéndose sobre ellas como los halcones (en contraste con los murciélagos de vuelo acrobático, que capturan insectos al vuelo). Con su aguzado oído pueden escuchar el batido de las alas de una polilla o las pisadas de un ciempiés próximo. Las orejas desempeñan un cometido importante en la localización del sonido, puesto que actúan como antenas direccionales en las que la potencia de la señal captada depende del azimut (el ángulo horizontal respecto a la dirección de desplazamiento del murciélago) y de la elevación del sonido. Y como los animales disponen de dos, pueden comparar el tiempo de llegada, la fase y la intensidad de la señal en ambas para localizar el sonido.

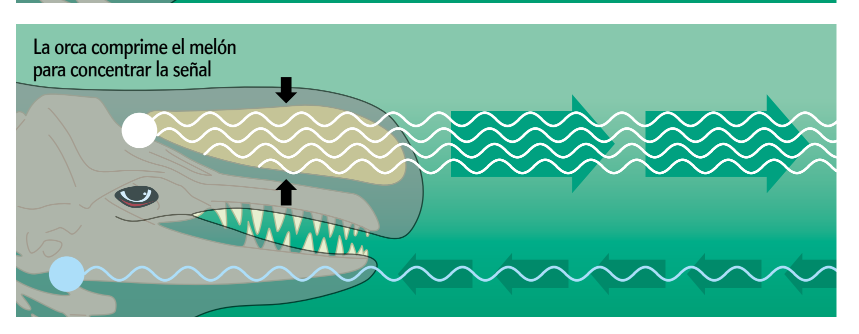
El oído interno del murciélago presenta la anatomía básica de los mamíferos, con una membrana basilar (estructura rígida situada entre los dos canales rellenos de líquido de la cóclea) que acoge las células ciliadas internas, sensibles a las vibraciones. La membrana adopta la forma de un teclado de piano invertido, cuya base rígida y estrecha vibra en respuesta a las frecuencias altas, mientras que la punta más flexible y ancha lo hace con las bajas; a lo largo de la membrana se produce una transición gradual entre ambos extremos. La membrana basilar lleva a cabo así un análisis de frecuencias de todas las señales recibidas. Las células ciliadas distribuidas a lo largo de la membrana basilar transmiten esta información a través del nervio auditivo hasta el cerebro, donde es procesada. La especialización más interesante de la membrana basilar se halla en los murciélagos de frecuencia constante: una parte importante de esta estructura está destinada a captar una estrecha banda de frecuencias que abarca el valor constante del chillido del murciélago. Esta porción de la membrana ha sido descrita como una «fóvea auditiva», por analogía con la región de la retina que alberga cuantiosos fotorreceptores. Su presencia indica que estos murciélagos disponen de una mayor resolución de frecuencias para detectar los ecos modificados por el efecto Doppler.

Saber el momento exacto en que llega el eco resulta primordial para calcular la distancia a la presa. Pero distinguir un eco entre el ruido de fondo se convierte en un prodigio cuando este llega a ser mil veces más potente. La ardua tarea es posible gracias a una función matemática conocida como correlación cruzada. El transmisor conserva una copia de la señal emitida y la compara continuamente con lo que escucha hasta que encuentra una buena concordancia. La concordancia se obtiene multiplicando la copia por la señal de entrada; cuando todo encaja, el producto de las dos curvas alcanza un pico que advierte al receptor de que el eco ha llegado. Este método resulta aún más eficaz si el impulso saliente es de frecuencia modulada, en forma de chillido.

El procesamiento de las señales Doppler brinda muchísima información al receptor porque, además del azimut, la elevación y la distancia, indica la velocidad relativa. Imaginemos un murciélago sobrevolando la campiña: todos los objetos en segundo plano, como el suelo, los árboles y los arbustos,





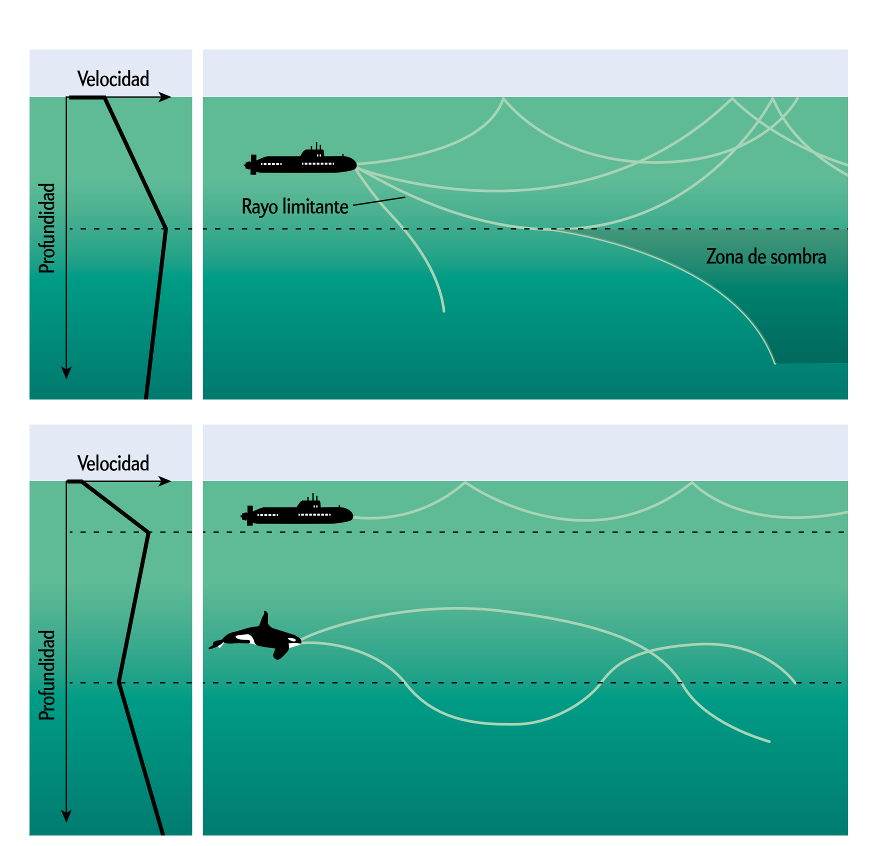


LA ORCA BASTARDA (*Pseudorca crassidens, arriba*) **es un cetáceo odontoceto provisto de melón, un órgano relleno de grasa alojado en la frente que actúa como una lente acústica. En fecha reciente se ha descubierto que esta especie puede modular el haz de ecolocación modificando la forma del melón y de las estructuras anejas (***centro y abajo***). Los haces estrechos son idóneos para buscar blancos remotos y determinar su dirección, en tanto que los anchos permiten barrer un área más extensa pero más cercana.**

DOUG PERRINE/SEAPICS.COM

tendrán una velocidad relativa igual a la del vuelo del animal. Supongamos ahora que una polilla vuela hacia él. La frecuencia Doppler de su eco será distinta y destacará como un blanco potencial. Los murciélagos de frecuencia constante dedican una parte desmesurada del cerebro y de su capacidad de procesamiento a analizar los diminutos cambios de frecuencia originados por el efecto Doppler. El equipo de Hans-Ulrich Schnitzler, de la Universidad de Tubinga, ha demostrado que el murciélago bigotudo emplea el efecto Doppler para percibir el batido de las alas de una polilla, una información potencialmente útil para reconocer diferentes presas.

La peor pesadilla de la recepción del sónar y el radar son los ecos parásitos, aquellos procedentes de los objetos indeseados. Corresponden a los retornos generados por la lluvia (parásitos de volumen) o por las superficies de fondo (cualquiera que reduzca la relación entre señal y ruido). Supongamos que intentamos detectar desde arriba un avión que sobrevuela una ciudad, cuyos edificios le retornan un sinfín de ecos complejos. Para un murciélago, la identificación de una polilla que sobrevuela un arbusto representa una situación similar, puesto que cada una de las hojas devuelve un eco confuso. Además del efecto Doppler, otro mecanismo demuestra utilidad en este tipo de situaciones. Algunos murciélagos emiten sonidos en parejas (o grupos estroboscópicos). Al modificar la frecuencia entre la primera y la segunda señal, el animal puede distinguir mejor los ecos recibidos, con lo que reduce el ruido parásito.



LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL MAR varía en función de la profundidad de la señal. Las propiedades del agua marina concentran el sonido en canales. Las señales de un submarino son desviadas hacia la superficie y rebotan en ella durante largas distancias, pero existe un límite a la refracción que crea una zona de sombra impenetrable para las señales (*arriba*). Un mamífero marino que nade a mayor profundidad puede utilizar otro canal que proyecta el sonido de forma lateral, en lugar de radial, lo cual facilita su transmisión (*abajo*).

Aun así, algunos insectos aprovechan los ecos parásitos para ocultarse en ellos. Las polillas fantasma (*Hepialus humulis*) se congregan en grupos de apareamiento a escasa distancia de la vegetación (a menos de medio metro) para confundirse en la nube de ecos parásitos que el murciélago recibe de la espesura. Tal vez numerosos insectos recurran a esta estratagema, análoga al camuflaje, y a otros métodos destinados a engañar la mirada de los depredadores.

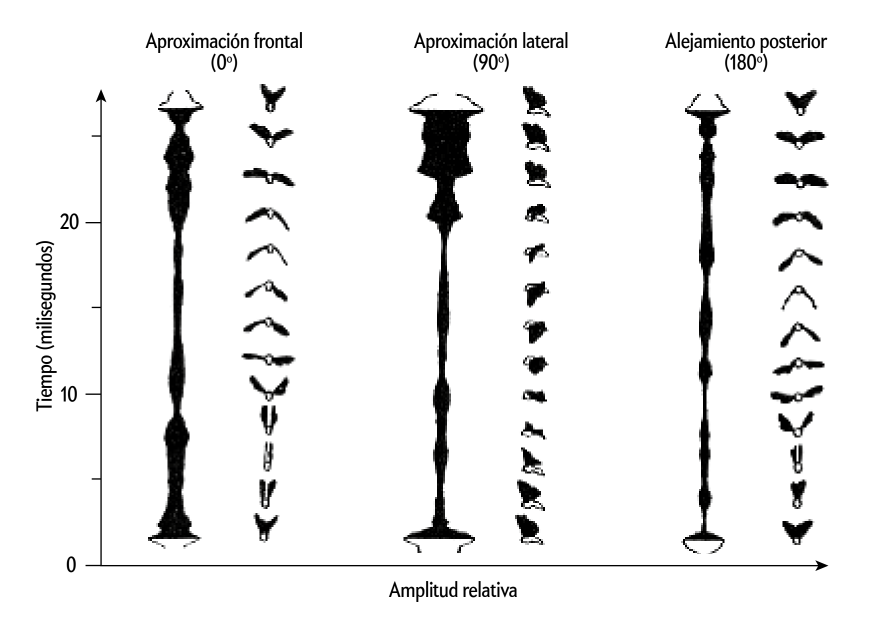
COMBATE EVOLUTIVO

Los ingenieros de radar y sónar compiten en una escalada incesante: cada mejora en la detección del blanco es contestada con una contramedida que pretende dificultar aún más la localización. En los últimos años, los proyectistas han intentado reducir al mínimo la sección equivalente de radar (RCS, por sus siglas en inglés), una medida de la detectabilidad de un blanco. El avión furtivo constituye el fruto de sus esfuerzos. Su RCS ha sido reducido mediante la ubicación en el ala de los voluminosos motores y superficies de mando, la acentuación de los ángulos que desvían los ecos lejos de los receptores de radar y el empleo de materiales compuestos y pinturas que absorben o amortiguan los ecos radáricos. Se rumorea que este tipo de bombarderos poseen un RCS tan diminuto como el de un sello de correos.

Los insectos, que no han querido ser menos, practican también este juego del escondite. Algunos recurren a mecanismos furtivos para disimular su firma acústica y engañar a los murciélagos. Jinyao Zeng, Shuyi Zhang y sus colaboradores, de la Universidad Normal de China Oriental en Shangái, creen que las escamas de las alas de las polillas reducen la amplitud de los ecos porque absorben los chillidos ultrasónicos del murciélago. Esta característica concede al insecto una pequeña pero importante ventaja a la hora de eludir la detección. Las escamas de las polillas nocturnas duplican con creces el factor de absorción de las alas en la banda de frecuencia que va de los 40 a los 60 kilohercios, lo que reduce la intensidad del eco unos 2 decibelios respecto a las alas sin escamas y dificulta la identificación de la polilla a distancia. Las alas de las mariposas empleadas como referencia no comparten esa peculiaridad pese a estar cubiertas de escamas. El mecanismo de absorción del sonido no se conoce todavía, pero las escamas de las polillas suelen estar separadas por espacios cubiertos por microporos y lagunas (espacios rectangulares) que recuerdan a los materiales sonorreductores artificiales. Apenas se ha comenzado a ahondar en este campo, pero sin duda se describirán nuevos ejemplos de técnicas de ocultación ideadas para engañar a los depredadores provistos de sistemas de ecolocación.

INTERFERENCIA DE SEÑALES

Tan pronto como unos ingenieros lograron diseñar aparatos de sónar y radar operativos, otros se aprestaron a neutralizarlos

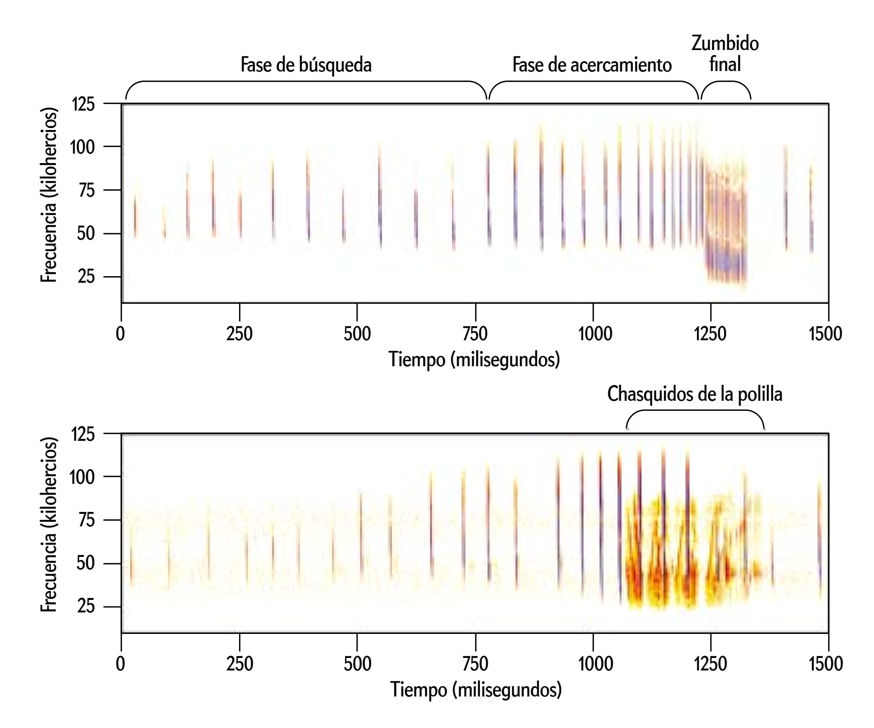


SEGÚN LA ORIENTACIÓN de un insecto en vuelo con respecto a un micrófono (frontal, lateral o posterior) su eco varía lo suficiente para que un murciélago de frecuencia constante detecte el batido de las alas, lo que le ayudaría a reconocer el tipo de presa de que se trata.

al interferir la recepción o el procesamiento de los ecos. En esta guerra electrónica, dos organizaciones destacan por sus contribuciones: los legendarios *Skunk Works* (Programas de desarrollo avanzado), de la firma aeronáutica Lockheed Martin, y la organización internacional sin ánimo de lucro *Association of Old Crows* (Asociación de cuervos viejos, nombre que se remonta a la Segunda Guerra Mundial, cuando los operadores y los equipos de radar aliados recibían el nombre en clave de «cuervos»). Ambas han diseñado contramedidas y anti-contramedidas electrónicas para el campo de batalla. Esta escalada de fintas y contrafintas recuerda a la carrera armamentística evolutiva que tanto fascina a los biólogos.

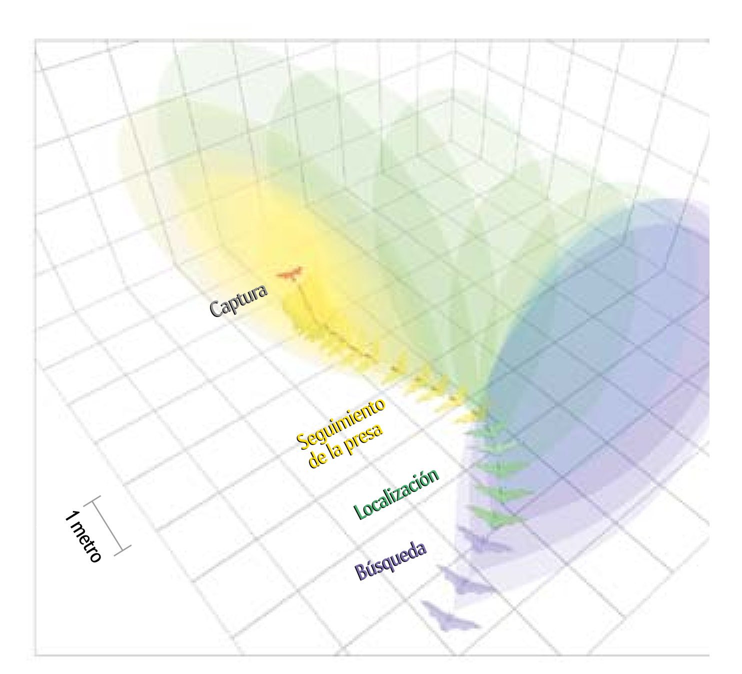
Los métodos de interferencia de señales se dividen en dos tipos: pasivos y activos. Entre los pasivos se hallan los reflectores antirradar, unas finas tiras de aluminio o fibra de vidrio metalizada que los aviones lanzan para confundir a los radares hostiles acerca de su localización y rumbo exacto. Los métodos activos consisten en señales electrónicas diseñadas para cegar o engañar al radar. El perturbador de ruido satura el receptor del radar con un potente ruido electrónico que dificulta la detección del eco más débil procedente del blanco. Otro tipo, el perturbador repetidor, emite una copia del eco real en un momento inadecuado para convencer al receptor de que ha detectado un objeto «fantasma» que se dirige en la dirección equivocada. La perturbación activa es un asunto delicado, porque el perturbador puede emitir involuntariamente una nueva señal que podría revelar al receptor del radar su ubicación real.

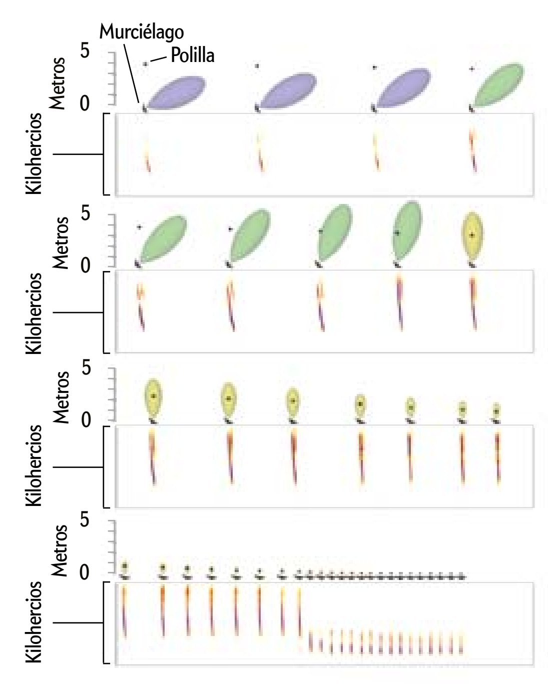
Tal vez parezca impensable que los insectos desplieguen semejantes artimañas contra los murciélagos, pero la carrera armamentística entablada entre ambos desde hace 65 millones de años supone casi una infinidad de tiempo para crear medidas y contramedidas sumamente refinadas. Miembros de mi laboratorio descubrieron que las polillas tigre ecuatorianas del género *Bertholdia* (subfamilia Arctiinae, familia Erebidae) prorrumpen en una cacofonía de chirridos cuando son perseguidas por un murciélago. Los insectos captan los ultrasonidos del agresor a través de una especie de oídos sintonizados a altas frecuencias y responden a ellos. Los sonidos «antimurciélago» emanan de unas vesículas quitinosas llamadas timbales, situadas en los costados del tórax. Cada timbal alberga una hilera de unas treinta estrías elásticas: cuando la musculatura las deforma en rápida sucesión, emiten un tren de chasquidos, al que le sigue otro cuando las estrías regresan a la posición inicial. El timbal emite así hasta 4500 chasquidos por segundo. De este modo, la mitad del tiempo en que el murciélago está procesando los ecos, recibe chasquidos falsos de la polilla. Tal es el sello



LAS GRABACIONES DE CAMPO de un murciélago del género *Myotis* registradas durante el ataque a una polilla de la familia *Noctuidae* muestran la diferencia entre las presas que emiten sus propios chasquidos para perturbar el sónar (*abajo*) y las que no lo hacen (*arriba*). En el sonograma superior, los chasquidos emitidos durante las fases de búsqueda, acercamiento y captura (el «zumbido final») demuestran que el murciélago consigue localizar y atrapar sin problemas a la polilla. A medida que se acerca a la presa, acorta el intervalo entre las vocalizaciones y hace que la «pantalla del sónar» se renueve con más rapidez. En el sonograma inferior, la secuencia queda perturbada cuando una polilla *Bertholdia trigona* replica con una serie de chasquidos que desorientan a su perseguidor.

CORTESÍA DE HANS-ULRICH SCHNITZLER, CON PERMISO DE SPRINGER VERLAG (*arriba*); CORTESÍA DE AARON CORCORAN (*abajo*)





ESTA SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL muestra el haz ultrasónico de un murciélago del género *Myotis* que persigue una polilla (*izquierda*), junto con los sonogramas de la secuencia de ecolocación correspondiente y gráficas en dos dimensiones de la forma del haz y la distancia respecto al blanco (*derecha*). Primero, el murciélago busca posibles presas con haces direccionales que no apuntan directamente a la polilla (*violeta*). Una vez detectada, la localiza y fija su haz en ella (*verde*). A continuación, disminuye la intensidad de las emisiones para mantener los ecos de retorno a un nivel constante desde la fase de seguimiento hasta la fase de captura (*amarillo*).

distintivo de un perturbador de sónar. Los timbales se hallan presentes en *Bertholdia* y otras especies afines; su distribución taxonómica hace pensar que se trata de una antigua arma contra los murciélagos provistos de sónar.

Uno de mis estudiantes, Aaron Corcoran, ha averiguado que los chasquidos de banda ancha de *Bertholdia* desorientan a los murciélagos tanto en el laboratorio como en el campo. ¿Cómo actúan estos sonidos perturbadores? El mecanismo es idéntico al de los sistemas de radar. Los experimentos indican que los «falsos» chasquidos emitidos por la polilla se superponen o preceden por muy poco a los auténticos ecos que informan sobre la ubicación de la presa, lo que interfiere en el cálculo de la distancia al objetivo realizado por el quiróptero.

Corcoran también ha comprobado que las polillas solo emiten las señales interferidoras cuando el murciélago fija el haz ultrasónico en ellas y corren un peligro inminente. La polilla se sabe amenazada porque percibe una ráfaga de sonidos cada vez más seguidos e intensos. El umbral para la emisión de los sonidos perturbadores en *Bertholdia* guarda una estrecha relación con esa percepción, lo que le permite saber inequívocamente si se halla en el punto de mira del murciélago.

La última escalada de esta carrera armamentística entre los quirópteros y las polillas es protagonizada por un murciélago furtivo, descubierto por Holger Goerlitz, Marc Holderied y sus colaboradores, de la Universidad de Bristol. El murciélago de bosque (*Barbastella barbastellus*) disminuye la intensidad de sus chillidos de ecolocación entre 10 y 100 veces cuando se dispone a capturar un insecto en pleno vuelo. Así impide que las polillas puedan percatarse de su presencia hasta que es demasiado tarde.

El juego de finta y contrafinta entre murciélagos y polillas puede describirse como una carrera armamentística en la que un nutrido grupo de quirópteros libra una batalla evolutiva contra multitud de especies de polillas. Apenas hemos comenzado a conocer los pormenores de esta carrera y sin duda nos deparará nuevas sorpresas. Las polillas tigre se cuentan por miles, con cerca de 11.000 especies en el mundo. Y se calcula que otros 200.000 tipos de polillas surcan el cielo nocturno, por no hablar de los escarabajos, grillos y saltamontes, moscas y mosquitos, crisopas, langostas o mantis que pululan al amparo de la noche. Cualquier insecto que alce el vuelo al caer el sol debe contar con una estrategia para hacer frente a los depredadores nocturnos más consumados, los murciélagos. La carrera prosigue.

PARA SABER MÁS

Moth hearing and the feeding strategies of bats. M. B. Fenton y J. H. Fullard en *American Scientist*, vol. 69, págs. 266-275, 1981.

Echolation in bats and dolphins. J. A. Thomas, C. F. Moss y M. Vater. University of Chicago Press, Chicago, 2004.

Tiger moths and woolly bears: behavior, ecology and evolution of the Arctiidae. W. E. Conner. Oxford University Press, 2008.

Tiger moth jams bat sonar. A. J. Corcoran, J. R. Barber y W. E. Conner en *Science*, vol. 325, págs. 325-327, 2009.

Moth wing scales slightly increase absorbance of bat echolocation calls. J. Zeng et al. en *PLoS One*, vol. 6, n.º 11, pág. e27190, 2011.

Sound strategies: The 65-million-year-old battle between bats and insects. W. E. Conner y A. J. Corcoran en *Annual Review of Entomology*, vol. 57, págs. 21-39, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Sistema acústico de orientación. M. Kössl y M. Vater en *MyC* n.º 4, 2003.

por Mireia Collado Pastor, Susana Agustí y Dolors Vaqué

Ciliados árticos, una explosión de vida

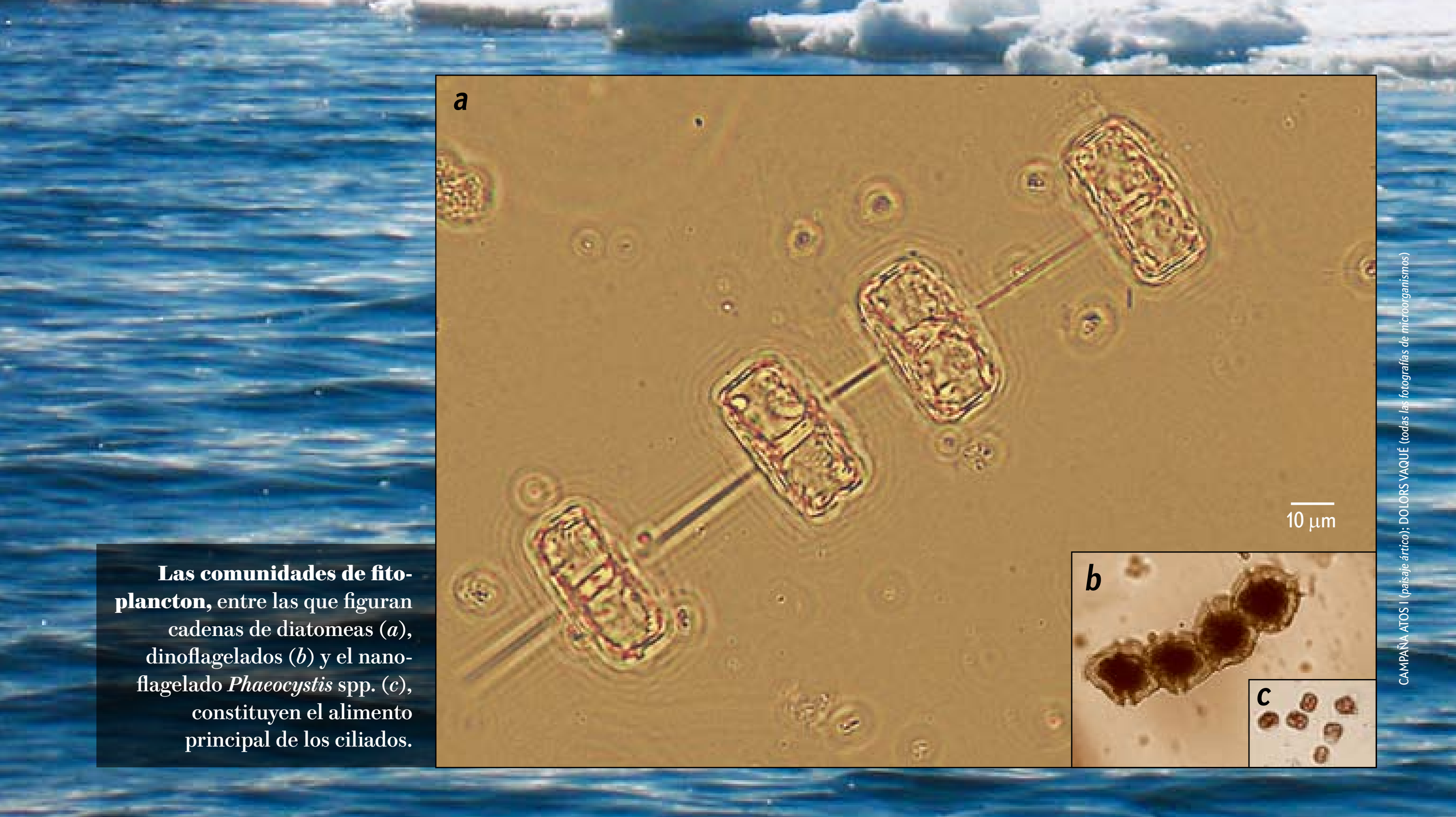
Durante el deshielo estival prolifera este grupo de microorganismos del zooplancton, de una diversidad extraordinaria

En el océano Ártico, el agua presenta un rango de temperatura que oscila entre los –1,8 ºC y los 8 ºC a lo largo del año. A pesar de resultar un lugar inhóspito para los humanos, en primavera, cuando aparecen los primeros rayos solares, empieza a despertar la vida microscópica. Al acercarse el verano se produce un deshielo masivo y los nutrientes que se hallaban atrapados en el hielo se incorporan a la columna de agua en grandes cantidades. Estos son aprovechados por algas microscópicas (fitoplancton) que dan lugar a grandes proliferaciones algales. Las hay de diversos tamaños, como *Phaeocystis* spp. (de 3 a 5 micrómetros), dinoflagelados (de 10 a 50 micrómetros) y diatomeas (de 20 a 50 micrómetros); constituyen el alimento principal de diferentes organismos del zooplancton, entre ellos los ciliados. Estos corresponden a microorganismos unicelulares de diversas formas y se hallan dotados de cilios, unas estructuras que los envuelven total o parcialmente y que utilizan para desplazarse y atraer a las presas.

Llama la atención que a estas altas latitudes, sometidas a temperaturas extremas, la abundancia de ciliados resulte similar o superior a la de lugares más templados; en ambas zonas se asemejan también los grupos representados con mayor frecuencia. Desde la superficie hasta los cien metros de profundidad podemos observar abundancias de entre 1000 y 6000 células por litro, además de una gran diversidad de formas y tamaños (entre 20 y 100 micrómetros). Los géneros y grupos más comunes son: *Lohmanniella* spp., *Strombidium* spp., *Strobilidium* spp., *Laboea* spp., *Tontonia,* spp., *Didinium* spp., *Mesodinium* spp. y numerosos tipos de tintínidos.

Hemos constatado que en el océano Ártico los ciliados proliferan con rapidez en verano, durante el deshielo, y se convierten en presa de copépodos, unos crustáceos diminutos que alimentan a los peces; los últimos serán consumidos por aves marinas y focas, y estas, a su vez, por osos polares. Se genera así un engranaje perfecto. Desgraciadamente, esta red trófica está amenazada por una dramática disminución de la cobertura de hielo desde finales de los años ochenta del siglo pasado. Ello se debe al incremento de temperatura terrestre provocado por el efecto invernadero, el cual no está controlado y sigue en aumento.

—Mireia Collado Pastor y Dolors Vaqué
Instituto de Ciencias del Mar (CSIC)
—Susana Agustí
Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (UIB-CSIC)



Las comunidades de fitoplancton, entre las que figuran cadenas de diatomeas (*a*), dinoflagelados (*b*) y el nanoflagelado *Phaeocystis* spp. (*c*), constituyen el alimento principal de los ciliados.

CAMPAÑA ATOS (*paisaje ártico*); DOLORS VAQUÉ (*todas las fotografías de microorganismos*)



Paisaje ártico, en el norte de las Islas Svalbard, en el que aparece un oso polar.

***Strobilidium* spp.**, un ciliado cosmopolita, consume principalmente microalgas.

***Tontonia* spp.** es un ciliado mixótrofo: se comporta como heterótrofo o fotótrofo según las condiciones del medio.

Los tintínidos, como el de la imagen, son ciliados que poseen lórica, una estructura tubular protectora.

por Jaume Sastre Juan

Jaume Sastre Juan es filósofo y doctor en historia de la ciencia por la Universidad Autónoma de Barcelona.



Diagramas en la arena

Nuevas miradas a la historia de las matemáticas en la antigüedad

En abril de 1998, un comprador anónimo adquirió un libro viejo, mohoso y casi ilegible en una subasta realizada en Christie's, Nueva York, por el módico precio de dos millones de dólares. Se trataba ni más ni menos que del palimpsesto de Arquímedes, un códice medieval que contiene las copias más antiguas conservadas de las obras del famoso matemático siracusano del siglo III a.C., y que volvía a salir a la luz tras permanecer en paradero desconocido durante casi todo el siglo XX.

Un palimpsesto es un manuscrito al que se le ha raspado el texto original para poder escribir otro encima, en este caso un libro de plegarias cuyas piadosas líneas no logran ocultar del todo el texto de Arquímedes. De no ser porque sobrevivieron tenuemente marcadas sobre este pedazo de piel de oveja, camufladas en el olvido bajo un libro de plegarias, obras como *Método* o *Stomachion*, cuyas únicas copias se encuentran en el palimpsesto, se hubiesen perdido para siempre.

Los comprensibles temores de que el manuscrito volviese a desaparecer a causa de la gestión privada del patrimonio científico se disiparon parcialmente cuando el anónimo propietario lo depositó temporalmente en el Museo Walters de Baltimore, en Maryland (EE.UU.), y un equipo multidisciplinar de expertos se puso manos a la obra. Los conservadores restauraron el maltrecho libro, los ingenieros desarrollaron nuevas técnicas de visualización para hacer aflorar las partes más ilegibles y los científicos del Acelerador Lineal de Stanford escanearon el manuscrito.



DIAGRAMA DE LA PROPOSICIÓN 21 del tratado *Sobre las espirales* tal como aparece en el palimpsesto de Arquímedes. El texto de un libro de plegarias del siglo XIII (*negro*) se superpone al texto de la copia del siglo X de las obras del matemático griego del siglo III a.C. (*rojo*).

Pero la pieza fundamental para resolver el rompecabezas planteado por los nuevos fragmentos desvelados fue sin duda el equipo de historiadores de las matemáticas liderado por Reviel Netz, de la Universidad Stanford. Su nueva lectura del *Método* defiende que Arquímedes estuvo más cerca del concepto de infinito de lo que se pensaba, y su reinterpretación del *Stomachion* lo transforma en el primer tratado de combinatoria de la historia. Netz forma parte de una joven generación de historiadores que se ha propuesto reescribir la historia de las matemáticas en la antigüedad, y que está demostrando que hay un método mucho más fructífero que la aplicación de nuevas tecnologías para arrojar luz sobre una cuestión tan aparentemente trillada: ponerse unas gafas teóricas distintas y plantear nuevas preguntas a los manuscritos.

¿Es que todavía queda algo por decir sobre personajes tan estudiados como Euclides o Arquímedes? A la luz de las últimas investigaciones, la respuesta es un rotundo sí. A pesar de sus innegables aportaciones y erudición, los grandes pioneros de la historia de las matemáticas en la antigüedad, como Thomas Heath u Otto Neugebauer, han sido criticados por caer en el error metodológico de proyectar hacia el pasado sus propias concepciones sobre las matemáticas. El objetivo de estos historiadores fue reconstruir el *contenido* matemático de los textos antiguos, que se consideraba independiente de la *forma* en la que se presentaban, por lo que era práctica común «traducirlos» al lenguaje del álgebra moderna para facilitar su estudio, sin advertir que de este modo se proyectaban conceptos y formas de proceder ajenos a los de la geometría griega.

Es de sobra conocida la influencia que han tenido los *Elementos* de Euclides (s. III a.C.) como modelo de rigor científico. Obras tan aparentemente dispares

como los *Principios matemáticos de la filosofía natural* de I. Newton (1687) o la *Ética* de B. Spinoza (1677) adoptaron la estructura deductiva euclidiana. A diferencia de la mayoría de los problemas matemáticos egipcios y mesopotámicos conservados, en los que básicamente encontramos instrucciones para resolver problemas, los teoremas de los *Elementos* tienen por objetivo *demostrar* aquello que en ellos se afirma. Por ejemplo, en la proposición 41 del libro I, lo importante para Euclides no es informar al lector de cuál es la relación que existe entre los cuadrados construidos sobre los catetos de un triángulo rectángulo y el cuadrado construido sobre la hipotenusa de dicho triángulo (relación ampliamente conocida por lo menos desde el año 1800 a.C.), sino demostrar y establecer firmemente que esto es así haciendo uso solamente de unos pocos postulados y los resultados previamente comprobados.

Inspirado por académicos como Geoffrey Lloyd, David Fowler o Wilbur Knorr, Netz se propuso estudiar la deducción euclidiana como una práctica cognitiva arraigada en su particular contexto histórico y cultural. Más que preguntarse por el *contenido* de lo que *decía* Euclides, se preguntó por la *forma* de lo que *hacía* y *por qué* funcionaba tan bien. Y la respuesta que dio es sorprendente. Los matemáticos griegos desarrollaron y usaron básicamente dos herramientas cognitivas para deducir: los diagramas y un lenguaje muy sintético y estandarizado. En última instancia, deducir era dibujar una figura y contar una historia sobre ella usando una terminología y una sintaxis codificada y repetitiva, con el objetivo de convencer irrevocablemente a todos quienes aceptasen las reglas de este particular juego intelectual.

Empecemos por la parte visual. Si las matemáticas modernas giran alrededor de ecuaciones, las griegas giraban alrededor de diagramas. Pero los diagramas que los geómetras trazaban en la arena en su práctica cotidiana, y luego dibujaban en los pergaminos, eran muy distintos de los diagramas modernos. Para empezar, no reproducían fielmente de forma pictórica aquello que representaban, sino que se limitaban a sugerir sus características topológicas generales. Algunas de las líneas rectas del diagrama de la ilustración representan en realidad lo que en el texto se describe como arcos curvos. Esto podía ser así porque, a diferencia de los diagramas modernos, los antiguos no eran meramente ilustrativos, sino que cumplían una función clave en la lógica del argumento.

El diagrama no era autónomo, sino que su correcta interpretación y uso dependía del texto, y viceversa; ello significa que la geometría griega correspondía a un tipo de matemáticas donde lo visual tenía un peso mayor que en la nuestra, cosa que queda desafortunadamente oscurecida en la inmensa mayoría de las ediciones modernas de textos matemáticos antiguos, que «corrigen» los diagramas para «adecuarlos» al texto. Además, el propio texto también presentaba características que lo convertían en una herramienta cognitiva para la demostración: el uso de un lenguaje extremadamente codificado y unívoco, estructurado en partes repetitivas reminiscentes de las fórmulas mnemotécnicas de los rapsodas, permitía hacer aflorar a la superficie las relaciones lógicas de la prueba y la necesidad de las conclusiones.

Lo crucial es que estas herramientas cognitivas nacieron en un contexto particular que fomentó estos desarrollos y no otros: una cultura agonística que veía las matemáticas como un juego intelectual. La comunidad de matemáticos griegos era un conjunto muy reducido y geográficamente disperso de varones de clase alta que dedicaban su tiempo de ocio de forma *amateur* y autodidacta a explorar demostraciones matemáticas, que sin duda fueron producto de un entorno cultural en el que las técnicas de persuadir al otro en un debate público eran políticamente cruciales.

Nada que ver con el contexto laboral en el que nacieron las matemáticas mesopotámicas, ni con las formas que estas tomaron. De hecho, esta nueva mirada aportada por la historia social y cultural no se circunscribe a la Grecia clásica. La historiadora Eleanor Robson, de la Escuela Universitaria de Londres, está reescribiendo la historia de las matemáticas mesopotámicas antiguas partiendo de un hecho muy sencillo: nos han llegado en forma de tablillas de arcilla escritas en cuneiforme. En el pasado, estas tablillas se habían recolectado —en realidad, saqueado— principalmente como objetos de coleccionismo, sin documentar con precisión su procedencia arqueológica. Sin embargo, la propia materialidad de las tablillas nos dice muchas cosas: su forma, su ubicación en la excavación o su ordenamiento espacial de la información son parámetros que permiten llegar a conclusiones sobre la fecha de confección, la procedencia geográfica del escriba o el contexto de uso, como en el caso de tablillas didácticas que han sido interpretadas como los restos de ejercicios escolares.

Es necesario tener en cuenta el contexto histórico y social para entender que la forma que adoptó el conocimiento matemático en Mesopotamia (instrucciones para resolver problemas) estaba estrechamente relacionada con la gestión de los nuevos estados urbanos por parte de la elitista casta burocrática y sacerdotal de los escribas, encargada de volver a delimitar las parcelas de tierra tras las crecidas del Éufrates, de gestionar logísticamente las grandes obras públicas, de llevar la contabilidad en los almacenes de grano, de establecer el calendario o de predecir el horóscopo del monarca. Así pues, al igual que la geometría griega y sus herramientas cognitivas no se pueden entender históricamente sin hacer referencia a sus orígenes de juego intelectual aristocrático en un contexto social marcado por las ciudades-estado independientes, el origen de las matemáticas mesopotámicas no puede separarse del ámbito del trabajo o de la religión astral en las primeras civilizaciones urbanas.

Para Netz, Robson y el resto de los historiadores sociales y culturales, las matemáticas no son algo abstracto e independiente de la cultura humana que las crea, sino algo concreto y particular, un producto social cambiante hecho por individuos y sociedades con motivaciones y maneras de ver el mundo específicas. Sus investigaciones nos invitan a adentrarnos en el mundo complejo pero rico de la historia, para ver emerger las matemáticas antiguas no como conceptos desencarnados flotando en un platónico mundo de las ideas a la espera de refinarse y desplegarse históricamente, sino como los esfuerzos y las experiencias de personas de carne y hueso haciendo incisiones en una tablilla de arcilla o pensando con diagramas en la arena.

PARA SABER MÁS

The shaping of deduction in Greek mathematics: A study in cognitive history. Reviel Netz. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

Los inicios de la ciencia occidental. David Lindberg. Paidós, Barcelona, 2002.

El código de Arquímedes. Reviel Netz y William Noel. Temas de Hoy, Madrid, 2007.

Mathematics in ancient Iraq: A social history. Eleanor Robson. Princeton University Press, Princeton, 2008.

por Philippe Kahn

Philippe Kahn es cofundador y director general de Fullpower Technologies, firma creadora de la tecnología MotionX, integrada en productos de Nike y Jawbone. Khan creó en 1997 la cámara-teléfono, integrando en su sistema operativo un sensor de imágenes y un teléfono móvil.



La tecnología que se lleva

Nos hallamos en la cima de una explosión de artilugios para llevar puestos, verdaderamente útiles y nada molestos de usar

Si ha de ponerse un monitor de sueño que resulta fastidioso es posible que opte por no utilizarlo o, si lo hace, que el hecho mismo de usarlo altere su forma de dormir. Hace pensar en el principio de incertidumbre de Heisenberg: el observador modifica el resultado del experimento. Si su monitor de sueño es un montaje de electrodos y cables, talmente tomado del laboratorio de Frankenstein, seguramente no lo utilice de forma sistemática; además, los datos que recoja y comunique el instrumento no serán de fiar.

En los últimos años, la tecnología «llevable» ha mejorado drásticamente. El perfeccionamiento de los sensores está posibilitando el diseño de dispositivos que pueden llevarse puestos y resultar imperceptibles. Los inventores —entre quienes me cuento— nos esforzamos para lograr sensores de mayor precisión, menor tamaño y batería más longeva. El objetivo es proporcionar una mejor experiencia de usuario.

Los sensores están evolucionando de forma rápida y notable. Estamos acoplando acelerómetros con giroscopios, miniaturizándolos y reduciendo su consumo energético. Nos valemos también de nuevos algoritmos de fusión de sensores para hacer inteligibles los datos que estos generan y se transmiten entre sí. La pulsera Jawbone UP (un monitor para el que mi equipo ha diseñado piezas que sirven a otros de referencia, *firmware* y otros componentes) analiza las pautas de actividad del usuario veinticuatro horas al día. Está concebido para avanzar hacia el «yo cuantificado», cosa que contribuirá a la salud de todo el mundo. Su diseño es elegante y robusto, y no hace falta quitárselo para la ducha. Al consultarle nuestro patrón de sueño, vemos cómo hemos dormido, y no los efectos de llevar puesto un artefacto extraño que perturba nuestro descanso.

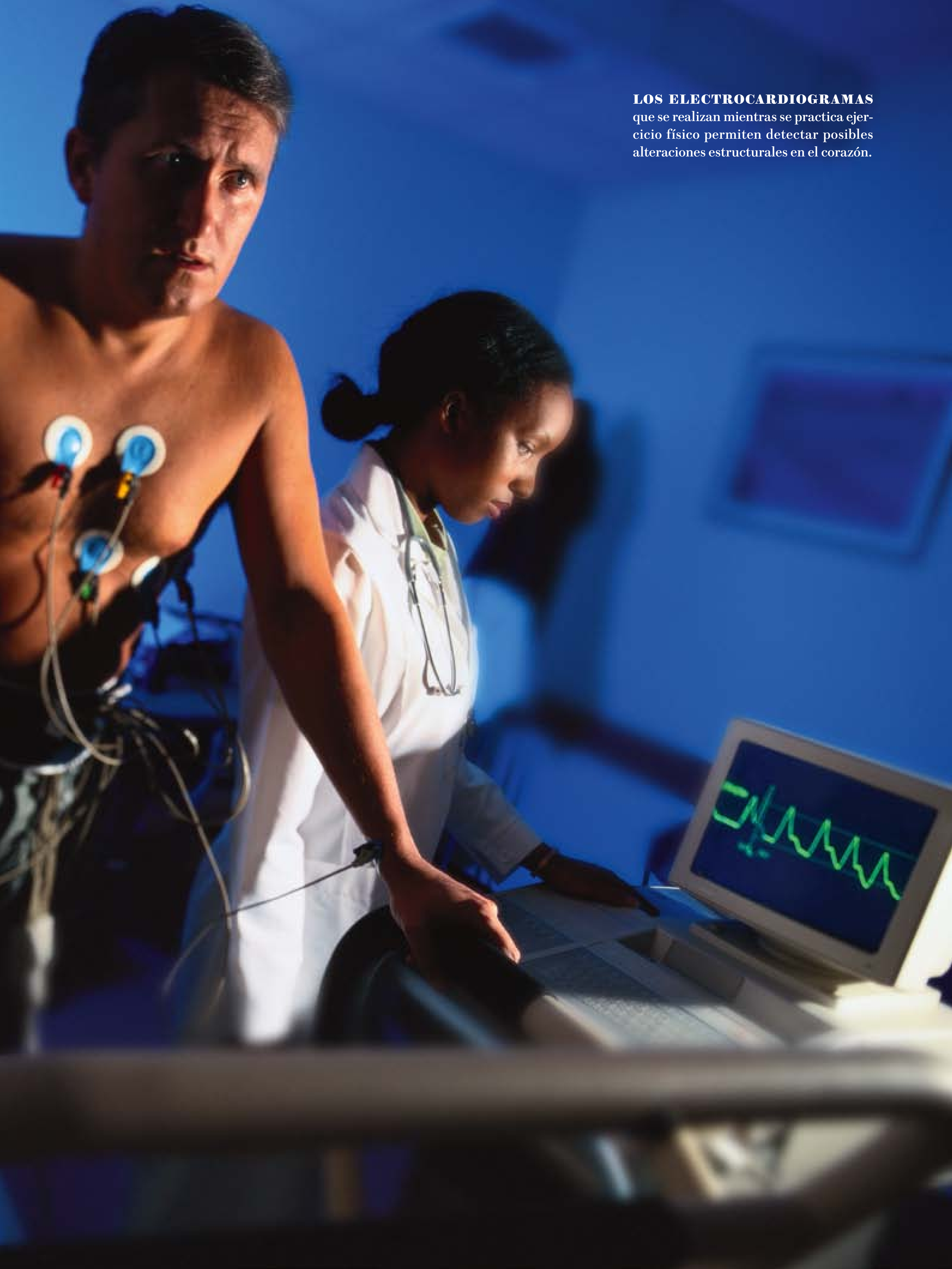
Los teléfonos inteligentes actuales disponen de sensores que captan imágenes, movimientos, campos magnéticos, la ubicación geográfica y la proximidad; sin embargo, tienden a usar estos sensores por separado. Mediante la fusión de sensores, mi teléfono podría detectar que me encuentro en el coche y mejorar mis sensaciones mediante la activación de las funciones más acordes con esta situación. Cuando salgo del coche para hacer ejercicio, o cuando voy a dormir, o hago cualquier otra cosa, mi teléfono se convertiría en un «camaleón contextual» mimetizándose de forma automática. Un dispositivo como un iPhone, un SmartWatch o un Google Glass podría convertirse en mi portavoz personal, integrado con mis otros artilugios llevables.

La tecnología que subyace a tales avances no es nueva. Hace diez años empezamos a desarrollar los componentes de cabo a rabo, los sistemas de gestión de energía, los generadores de recomendaciones y otros componentes de la pulsera Jawbone UP. En nuestro diseño original, de 2005, el dispositivo se sincronizaba con el teléfono por vía inalámbrica y utilizaba la pantalla de este para presentar los datos en tiempo real. Pero la tecnología Bluetooth de baja energía, necesaria para alargar la vida de la batería en el dispositivo, está ahora empezando a madurar. Al igual que han hecho falta quince años para que la integración de la cámara fotográfica en el teléfono fuese universal, nos encontramos ahora en la cima de dispositivos ubicuos, que se llevan puestos y que cumplen un amplio abanico de funciones.



VIKTOR KOEN

Algunas de las aplicaciones más prometedoras de la tecnología «llevable» pueden hallarse en la supervisión, prevención, tratamiento e incluso curación de enfermedades. Para personas con males crónicos (obesidad, apnea del sueño, diabetes, cardiopatías, alzhéimer), los dispositivos de medición clínica mencionados pueden suponer una enorme diferencia en su calidad de vida, ampliable al control de epidemias. Ofrecen una oportunidad única para casar con terapias de nueva generación, con formas mucho más eficaces y personalizadas de prescripción y administración de tratamientos. Un parche para la diabetes, por ejemplo, que liberase su medicamento de la mano de una pulsera de control de actividad proporcionaría una dosificación personalizada y óptima, mejorando a la par las terapias y los resultados —el paso siguiente a la bomba de insulina—. Tenemos ahora la oportunidad de revolucionar la salud de muchas personas con nuestra tecnología y nuestra propiedad intelectual, y ofrecer una solución que podría ampliarse, sin pérdida de calidad, a un problema de alcance planetario.



LOS ELECTROCARDIOGRAMAS que se realizan mientras se practica ejercicio físico permiten detectar posibles alteraciones estructurales en el corazón.

Marta Sitges es cardióloga, especialista en diagnóstico por imagen cardíaca. **Josep Brugada** es cardiólogo, especialista en enfermedades del ritmo cardíaco y pionero en el estudio de la muerte súbita. Ambos son miembros del grupo de Cardiología Deportiva del Hospital Clínico de Barcelona, que colabora en la prevención de la muerte súbita de deportistas profesionales y de alto rendimiento y evalúa de forma rutinaria su sistema cardiovascular.



MEDICINA

Adaptación cardíaca al ejercicio físico

El sistema cardiovascular experimenta cambios adaptativos en respuesta al entrenamiento. Identificarlos y distinguirlos de las enfermedades cardíacas resulta de vital importancia a la hora de practicar deporte

Marta Sitges y Josep Brugada

Numerosas investigaciones demuestran que el ejercicio moderado previene el desarrollo de enfermedades cardiovasculares. De hecho, los beneficios del deporte sobre la calidad de vida y la longevidad son conocidos ya desde la época de Hipócrates. Sin embargo, el primer estudio científico que introdujo el concepto de beneficio cardiovascular inducido por la práctica de ejercicio físico no apareció hasta 1953. Publicado por el epidemiólogo Jerry Morris, por entonces en el Consejo de Investigación Médica del Reino Unido, y sus colaboradores en la prestigiosa revista médica *The Lancet*, el trabajo describía cómo los revisores que subían y bajaban las escaleras de los dos pisos de los autobuses de Londres sufrían la mitad de fallecimientos a causa de una enfermedad coronaria que los conductores del mismo autobús que pasaban el día sentados frente al volante.

EN SÍNTESIS

Cuando practicamos deporte de forma regular, el corazón sufre una serie de modificaciones en su estructura y función para adaptarse a la mayor demanda de oxígeno que existe en los músculos del cuerpo.

Tales cambios, fisiológicos y normales, resultan a menudo difíciles de distinguir de ciertas cardiopatías incipientes, las cuales pueden provocar problemas a la hora de hacer deporte.

El desarrollo continuo de las distintas técnicas médicas permite diferenciar cada vez mejor la situación normal de la patológica.

STOCKBYTE/THINKSTOCK

No obstante, en los últimos años varias investigaciones han descrito una asociación entre el ejercicio físico intenso y crónico y el aumento de los trastornos del ritmo cardíaco, entre ellos la fibrilación auricular y otras anomalías con posibles consecuencias devastadoras, como la muerte súbita. Los cambios estructurales y funcionales que se producen en el sistema cardiovascular en respuesta al entrenamiento se asemejan a menudo a situaciones de enfermedad, con dilatación, hipertrofia o incluso fibrosis del corazón. Por este motivo, resulta de vital importancia distinguir las características adaptativas de las patológicas, aspecto que algunas técnicas avanzadas están ayudando a determinar.

DEPORTE Y SALUD CARDIOVASCULAR

La influencia positiva de la actividad física sobre la salud cardiovascular se debe en parte a su capacidad de mitigar los factores de riesgo, principalmente la hipertensión arterial, la diabetes mellitus, la dislipemia (alteración del metabolismo de los lípidos) y la obesidad.

Numerosos equipos, como el de Peter Kokkinos, del Centro Médico de Veteranos en Washington, han descrito reducciones notables de la presión arterial en personas que siguen programas de entrenamiento físico aeróbico, así como un menor riesgo de muerte cardiovascular en los sujetos hipertensos, sobre todo cuando realizan ejercicio de resistencia (como la carrera a pie o el ciclismo).

En relación con la diabetes mellitus, se sabe que la actividad física representa un estímulo, independiente de la secreción de insulina endógena, que hace incrementar el consumo de glucosa en las células musculares al aumentar la capacidad de la insulina para metabolizar la glucosa. Amplios estudios epidemiológicos y de intervención han demostrado que el ejercicio constituye, en general, una medida muy eficaz para retrasar o incluso evitar el desarrollo de diabetes mellitus, así como para disminuir la mortalidad de los sujetos que la padecen. De este modo, William C. Knowler, de los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU., y sus colaboradores describieron que el riesgo de padecer diabetes mellitus de tipo 2 disminuía hasta más de la mitad si se seguían ciertos programas de ejercicio físico. De hecho, estos resultaron incluso más eficaces que los tratamientos farmacológicos, ya que para prevenir un caso de diabetes, se calculó que 6,9 personas deberían realizar cambios de su modo de vida (actividad física, dieta), en comparación con 13,9 que deberían recibir metformina, un medicamento utilizado en el tratamiento de esta enfermedad.

Durante el ejercicio, el gasto cardíaco se eleva para asegurar una mayor provisión de sangre oxigenada al corazón. Ello se consigue intensificando la frecuencia y la fuerza de contracción.

Por otro lado, la mayoría de los estudios epidemiológicos y aleatorizados han demostrado que el ejercicio practicado con una intensidad, duración y cantidad adecuados ejerce un efecto favorable sobre los niveles de lípidos en sangre en sujetos con y sin dislipemia. Los cambios más significativos se han observado en los niveles del colesterol transportado por las lipoproteínas de alta densidad (colesterol de las HDL, por sus siglas en inglés; también conocido como colesterol «bueno», por su acción cardioprotectora), que aumentan de forma notable con programas de actividad física. Ello determina en parte el consiguiente efecto beneficioso sobre la salud cardiovascular. Además, el ejercicio refuerza el resultado de las dietas bajas en grasas o de los fármacos que tienen como objeto reducir los niveles del colesterol transportado por las lipoproteínas de baja densidad (colesterol de las LDL, llamado también colesterol «malo»).

Por último, y aunque los datos disponibles resultan aún controvertidos, la mayor actividad física contrarresta los efectos negativos de la obesidad o el sobrepeso. De hecho, Mikael Fogelholm, de la Unidad de Investigación sobre Salud de la Academia de Finlandia, y sus colaboradores han descrito reducciones en el riesgo cardiovascular y la mortalidad en sujetos que realizan ejercicio, con independencia de la cantidad de peso perdida a causa de este.

En conclusión, no hay duda de que la actividad física y el deporte resultan muy favorables para la salud y su promoción constituye un medio eficaz, en términos de salud pública, para prevenir y tratar las enfermedades cardiovasculares.

FISIOLOGÍA DEL EJERCICIO

Todos los tipos de actividad física requieren un aumento en el trabajo de la musculatura esquelética (la que se halla unida al esqueleto y se utiliza en el movimiento). Existe una relación directa entre la intensidad del ejercicio y la demanda corporal de oxígeno.

Para satisfacer el aumento de la demanda de oxígeno por el músculo esquelético, durante el ejercicio se incrementa el riego sanguíneo a través de los músculos mediante un mecanismo doble: local y cardiocirculatorio.

El primero consiste en ampliar el diámetro de los capilares sanguíneos que irrigan los músculos. Se calcula que en reposo solo están abiertos el 25 por ciento de ellos; a medida que se ejercita van abriéndose con el fin de favorecer el transporte de sangre oxigenada hacia la musculatura. Ello se consigue, en gran parte, mediante la liberación de sustancias vasodilatadoras, como la adenosina o la acetilcolina, durante la contracción muscular. De este modo, la irrigación puede aumentar hasta 20 veces. Si se tiene en cuenta la gran cantidad de musculatura esquelética que hay en el cuerpo, tal incremento supone un estrés importante para el sistema circulatorio, el responsable de bombear la sangre y proporcionar esa demanda rápida e intensa que conlleva el ejercicio físico.

El mecanismo cardiocirculatorio que permite adaptarse a esa exigencia conlleva un aumento del gasto cardíaco. Este corresponde a la cantidad de sangre bombeada por unidad de tiempo y suele expresarse en litros por minuto. Durante el ejercicio, el gasto cardíaco se eleva para asegurar una mayor provisión de sangre oxigenada al músculo esquelético. Este aumento se consigue intensificando, en primera instancia, la frecuencia cardíaca (efecto cronotropo) y, por otro lado, su fuerza contráctil (efecto inotropo), todo ello como consecuencia de una gran activación del sistema nervioso simpático (el que se encarga de prepararnos para la acción y regular las actividades que necesitan un consumo de energía). Además, la gran vasodilatación capilar que se produce en el músculo esquelético hace aumentar el flujo de sangre que retorna al corazón, lo que a su

vez provoca en él una mayor fuerza de contracción, de acuerdo con la denominada ley de Frank-Starling. La combinación de estos dos fenómenos (estimulación del sistema simpático y ley de Frank-Starling) permite multiplicar hasta cinco o más veces el gasto cardíaco durante el ejercicio, en comparación con la situación de reposo.

Finalmente, la descarga (o estimulación) simpática es responsable de una elevación de la presión arterial, conocida como respuesta hipertensiva sistémica, que también promueve el riego sanguíneo de los músculos. El incremento es variable según el tipo de ejercicio que se practique, ya que la vasoconstricción de las arterias sistémicas se compensa con la vasodilatación de los capilares musculares, debido a la liberación de sustancias vasodilatadoras mencionada arriba. Por consiguiente, en aquellos tipos de entrenamiento que usen mucha fuerza pero poca masa muscular, como los isométricos, en los que el músculo no se desplaza, la presión arterial se elevará más que cuando se realicen ejercicios de tipo isotónico, como correr, en los que el músculo sí se desplaza y se utiliza una mayor cantidad de masa muscular.

Los cambios hemodinámicos que ocurren durante el ejercicio constituyen el principal estímulo para la adaptación crónica del sistema cardiovascular al entrenamiento (el denominado corazón de atleta), cuyo objetivo no es otro que mejorar la capacidad y rendimiento del sistema para satisfacer las demandas de los músculos esqueléticos durante el ejercicio.

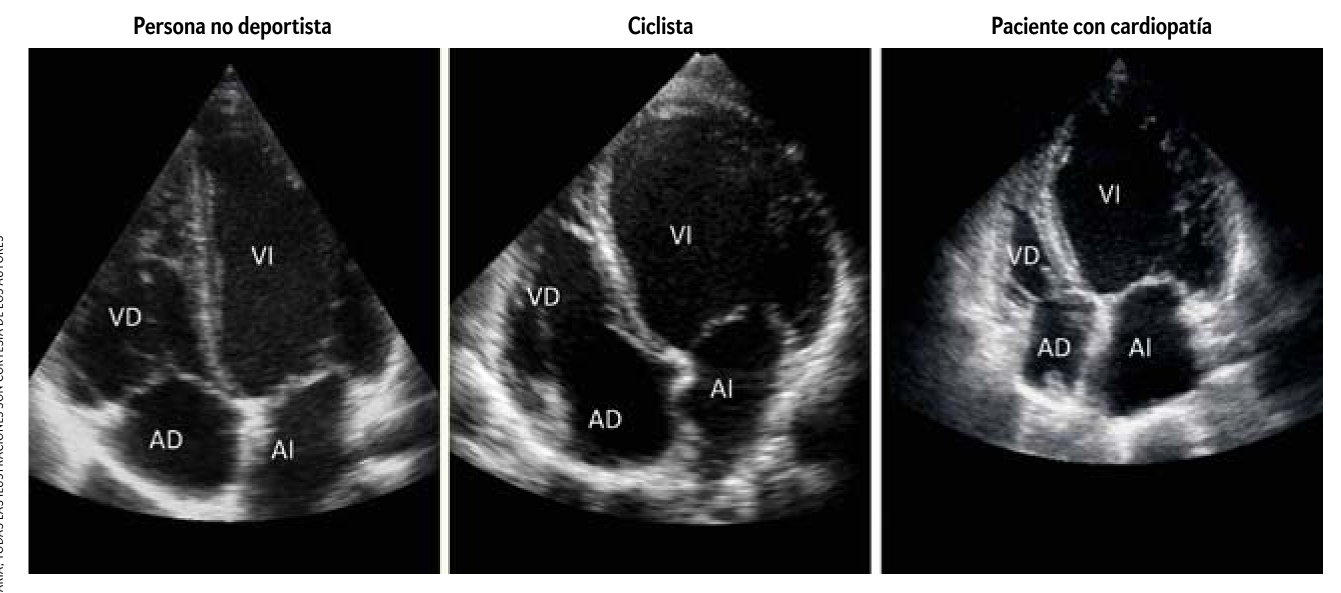
CORAZÓN DE ATLETA

Se sabe desde hace más de un siglo que el sistema cardiovascular de las personas entrenadas difiere estructural y funcionalmente del de la población general. La primera descripción de la entidad clínica del corazón de atleta fue realizada por el sueco Salomon E. Henschen en 1899, quien identificó una dilatación de las cámaras del corazón en esquiadores de fondo, a la cual atribuyó una mayor capacidad de trabajo cardíaco. Desde entonces, se ha debatido en diversas ocasiones sobre la verdadera naturaleza del corazón de atleta, es decir, si los cambios son el resultado de una adaptación fisiológica de carácter benigno o, por el contrario, son potencialmente patológicos y pueden considerarse un factor precursor de la enfermedad.

En el corazón de los deportistas, las modificaciones estructurales que se producen en el ventrículo izquierdo y el derecho son semejantes, con un aumento de la masa, el volumen y el diámetro interno de ambas cámaras. Asimismo, se observa con frecuencia el crecimiento de la aurícula izquierda, que es proporcional al del ventrículo del mismo lado, cambio que se ha asociado a un mayor riesgo de arritmias, como la fibrilación auricular (*véase el recuadro* «Corazón entrenado»).

Aunque los sujetos entrenados suelen practicar distintos tipos de ejercicio, en general se acepta que en el deporte dinámico o de resistencia la sobrecarga de volumen (la cantidad de sangre que circula en el corazón) y el aumento del gasto cardíaco son más marcados que la elevación de la presión arterial, a diferencia de lo que sucede en los deportes estáticos o de potencia. En los deportes de resistencia (de mayor duración y ritmo más lento, como una maratón), se produciría un remodelado más de tipo hipertrofia excéntrica, con una mayor dilatación de las cavidades, sobre todo las ventriculares, mientras que en los deportes de potencia o estáticos (de menor duración pero mayor potencia o intensidad, como correr los cien metros lisos o la halterofilia) tenderían a producirse adaptaciones del tipo hipertrofia concéntrica, con un mayor engrosamiento de las paredes ventriculares y una menor dilatación de su cavidad.

El comportamiento de la función del músculo cardíaco en respuesta al ejercicio ha sido también estudiado con técnicas de imagen médica como la ecocardiografía. En el ventrículo izquierdo las funciones sistólica (expulsión de la sangre del corazón) y diastólica (llenado con sangre) están aumentadas. En cambio, en el ventrículo derecho los resultados de diferentes estudios, escasos por otro lado, son contradictorios. Aparentemente, la función global del ventrículo derecho está conservada, pero algunos datos recientes apuntan que durante la actividad de alta



ESTAS IMÁGENES ECOCARDIOGRÁFICAS muestran las diferencias en la dimensión y forma del corazón de un sujeto no deportista (*izquierda*), un ciclista (*centro*) y un paciente afecto de una miocardiopatía dilatada (*derecha*). Tanto el ciclista como el paciente con miocardiopatía dilatada presentan un ventrículo izquierdo más dilatado y esférico que el sujeto de control no deportista. El ciclista no sufre miocardiopatía, a pesar de que el aspecto morfológico de su corazón es similar al del enfermo. (AD: aurícula derecha; AI: aurícula izquierda; VD: ventrículo derecho; VI: ventrículo izquierdo.)

intensidad la sobrecarga en él es superior, debido a un aumento desproporcionado de la presión en la circulación pulmonar en comparación con el de la presión arterial sistémica. Se ha observado asimismo que los deportistas profesionales presentan una aurícula derecha más dilatada que la izquierda.

Todos estos cambios adaptativos al entrenamiento permiten aumentar el llenado de sangre en el corazón durante la diástole, lo que a su vez genera de forma mantenida un mayor volumen de expulsión de sangre en la fase de sístole, incluso a las elevadas frecuencias cardíacas que se producen durante el ejercicio.

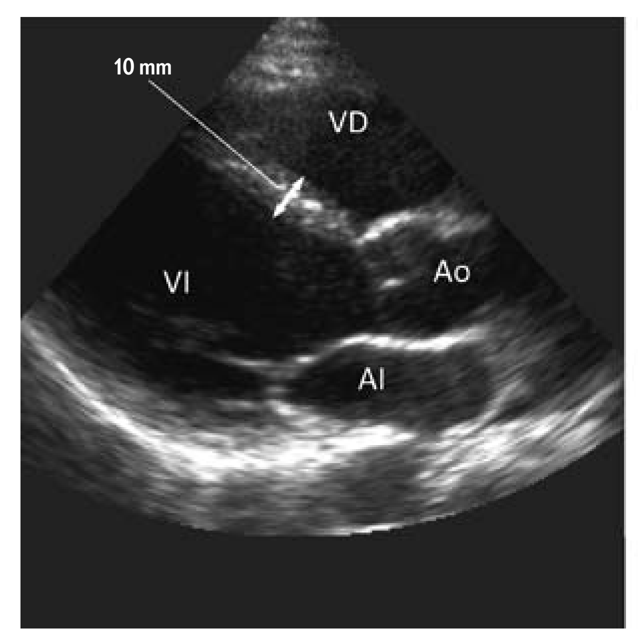
La muerte súbita supone un reto para la concepción del deporte como un elemento beneficioso para la salud cardiovascular

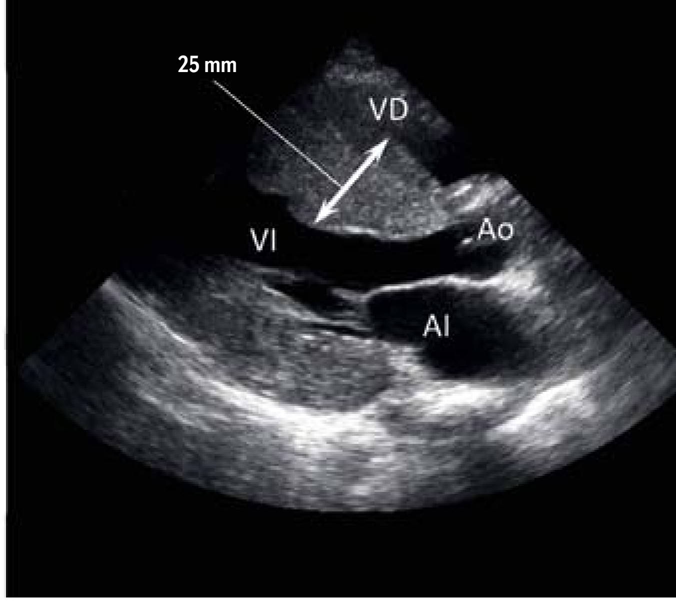
DISTINGUIR LA PATOLOGÍA

La problemática puede plantearse en el momento de evaluar a un sujeto deportista que presenta cambios estructurales importantes en el corazón. Estos pueden ser el resultado de la simple adaptación fisiológica —y, por tanto, normal— al entrenamiento crónico, pero también se observan en fases incipientes de algunas enfermedades del músculo cardíaco. Entre ellas cabe destacar la miocardiopatía hipertrófica y la miocardiopatía dilatada, en las que las paredes miocárdicas se engruesan y la cavidad ventricular se dilata, respectivamente.

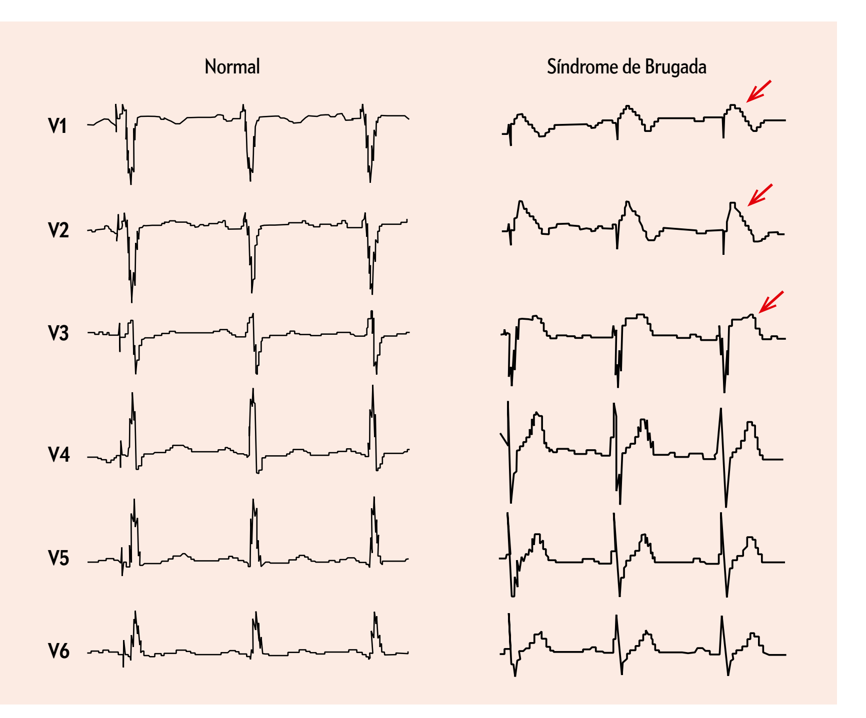
Los límites de las dimensiones cardíacas que se establecen como normales son algo distintos entre los deportistas y la población general. Mediante el estudio de un amplio grupo de deportistas, Antonio Pelliccia, del Instituto de Medicina del Deporte del Comité Olímpico Nacional Italiano, y sus colaboradores han demostrado que un 14 por ciento de ellos presentan una dimensión interna del ventrículo izquierdo superior a 60 milímetros, el valor máximo considerado normal en la población general. Igualmente, han observado que hasta un 20 por ciento poseen una aurícula izquierda con un tamaño superior al máximo normal, en especial cuando se trata de varones. En cuanto al grosor de la pared ventricular, este sobrepasa el límite superior normal en un 2 por ciento de los deportistas de raza blanca y hasta en el 13 por ciento de los de raza negra. La aorta también puede estar ligeramente agrandada en los sujetos entrenados, sin que ello suponga la existencia de patología aórtica. Como se ha comentado, estas modificaciones se producen para adaptarse a los mayores requerimientos de sangre expulsada en cada latido cardíaco durante la práctica deportiva.

Por tanto, en ocasiones se plantea el reto diagnóstico de diferenciar entre lo que son cambios estructurales cardíacos adaptativos, sin ninguna repercusión terapéutica ni pronóstica, de aquellos que pueden deberse a la presentación incipiente de una enfermedad, con implicaciones terapéuticas y pronósticas muy distintas. En el ámbito del deporte competitivo supone la potencial interrupción o incluso el cese definitivo de la carrera deportiva; por ello, un diagnóstico adecuado resulta decisivo. Afortunadamente, el desarrollo continuo de las distintas técnicas de imagen aplicadas al corazón, como la ecocardiografía y la resonancia magnética, así como la respuesta al desentreno, permite diferenciar cada vez mejor estas dos situaciones. Esta última prueba consiste en establecer períodos de reposo y cese del entrenamiento ante casos de duda; si al cabo de un tiempo se observa que los cambios se corrigen, ello significa que estos correspondían a un mecanismo adaptativo,





AL EXAMINAR UN CORAZÓN NORMAL mediante una ecocardiografía, se observa que su pared miocárdica (septo interventricular) tiene un grosor máximo de 10 milímetros (*izquierda*). En un corazón afecto de miocardiopatía hipertrófica ese valor alcanza los 25 milímetros (*derecha*). El grosor supera con creces el rango de la adaptación al entrenamiento crónico (el valor máximo «normal» correspondería a 12 milímetros), lo que constituye un rasgo claramente patológico. (Ao: aorta; AI: aurícula izquierda; VD: ventrículo derecho; VI: ventrículo izquierdo.)





EL ELECTROCARDIOGRAMA (ECG) constituye una herramienta útil para detectar posibles alteraciones cardíacas que podrían ocasionar muerte súbita. En la imagen se muestran dos ECG de superficie de 12 derivaciones (solo se ilustran seis de ellas). Uno corresponde al patrón clásico de un corazón normal; en el otro se observa la anomalía en «aleta de tiburón» (*flechas*), que permite realizar el diagnóstico de síndrome de Brugada, un trastorno en los canales del sodio del miocardiocito que altera su conducción eléctrica y que ocasiona la aparición de arritmias malignas responsables de muerte súbita.

mientras que si persisten, probablemente nos hallemos ante una enfermedad cardíaca.

Por otro lado, el efecto de la adaptación al entrenamiento sobre la progresión de determinadas cardiopatías leves, como la presencia de una válvula aórtica bicúspide, una enfermedad valvular leve o un pequeño cortocircuito intracardíaco, es aún muy desconocido.

Los cambios estructurales en el corazón de sujetos entrenados se identifican en el electrocardiograma (ECG) como alteraciones que afectan sobre todo al segmento de la repolarización eléctrica (fase en la que, tras terminar el estímulo cardíaco, se recupera el umbral eléctrico de la situación basal). Una vez más, estos signos en una persona no entrenada podrían representar una patología cardíaca, pero en sujetos deportistas pueden considerarse totalmente normales. También resultan más frecuentes en varones y en la raza negra. Una vez más, suponen un reto en el diagnóstico diferencial del límite entre la adaptación al entrenamiento y la enfermedad incipiente. Dada la elevada prevalencia de alteraciones en el ECG del sujeto entrenado, algunas sociedades científicas, como la Sociedad Europea de Cardiología, han elaborado documentos de consenso en el que definen los signos normales y anómalos en el ECG de los deportistas.

TRASTORNOS DEL RITMO CARDÍACO

En los últimos años han ido apareciendo estudios que asocian la práctica deportiva intensiva y crónica con una mayor incidencia de trastornos del ritmo cardíaco, principalmente la fibrilación auricular (latidos de la aurícula descoordinados e irregulares). El origen de esa alteración se ha atribuido a diversos factores, como una mayor activación del sistema nervioso parasimpático o vagal durante el reposo o la propia adaptación estructural cardíaca al entrenamiento. En este sentido, un análisis conjunto publicado en 2009 en *Europace* por Jawdat Abdulla y Jens R. Nielsen, del Hospital Glostrup de Copenhague, en el que se incluyeron datos obtenidos por nuestro grupo, ha demostrado que los deportistas presentan un riesgo cinco veces mayor de padecer fibrilación auricular que los sujetos no entrenados. Sin embargo, las características de esta arritmia son distintas entre ambos grupos; en general, afecta a los deportistas de mediana edad en forma de crisis paroxísticas que suelen aparecer cuando se hallan en reposo, ya que están mediadas por el sistema parasimpático o vagal.

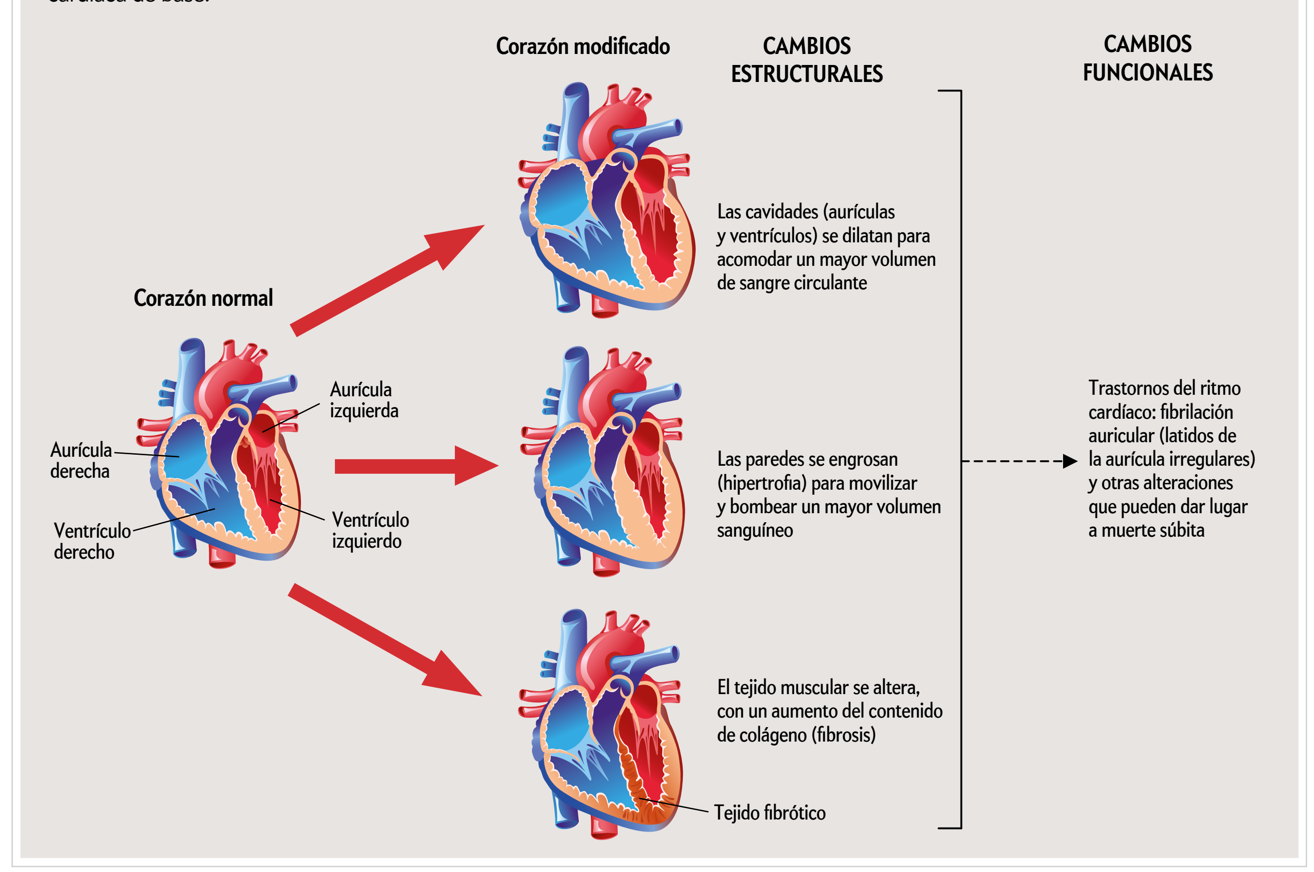
Además de la fibrilación auricular (arritmia benigna), son también conocidos los casos de muerte súbita en el mundo del deporte. Esta se define como la que se produce de forma abrupta e inesperada en menos de una hora desde el inicio de los síntomas. La causa última de la muerte súbita es un trastorno grave del ritmo cardíaco (arritmia maligna) que produce un paro cardíaco y la muerte inmediata del sujeto. Cuando esta afecta a pacientes jóvenes, y en especial a los deportistas, tiene un efecto devastador. Además, supone un reto para el concepto del deporte como una herramienta beneficiosa en la salud cardiovascular.

La incidencia de muerte súbita asociada al deporte descrita en las diferentes series se sitúa entre 0,5 y 3 casos cada 100.000 personas al año. A pesar de las limitaciones existentes en los registros realizados hasta la fecha, en parte debido a una falta de centralización de los datos y a que estos se basan a menudo en reportajes aparecidos en los medios de comunicación, tales cifras se repiten de forma más o menos constante en la bibliografía. De este modo, un estudio de seguimiento reciente sobre la maratón de Boston durante diez años ha demostrado una incidencia de muerte súbita entre las cifras indicadas; también se ha observado una incidencia similar entre los deportistas especializados en diferentes disciplinas.

En la gran mayoría de los casos, la muerte súbita se produce por una enfermedad cardíaca subyacente, ya sea hereditaria o adquirida. En las personas de edad inferior a los 35 años, las causas más frecuentes son la miocardiopatía hipertrófica (el engrosamiento del músculo cardíaco que provoca una disfunción del órgano), que afecta a 1 de cada 500 personas; la miocardiopatía arritmogénica (latidos arrítmicos debidos a una alteración de una parte del tejido miocárdico); y otras patologías, como las anomalías del origen y trayectoria de las arterias corona-

Corazón entrenado

Durante la actividad física se activan distintos mecanismos con un único objetivo: que el corazón expulse en cada latido un mayor volumen de sangre. Este cambio en la dinámica circulatoria, cuando es sostenido (como en el entrenamiento crónico), genera modificaciones adaptativas en la estructura y geometría cardíaca. Se está estudiando si estas modificaciones son las causantes de ciertas alteraciones funcionales, como los trastornos del ritmo cardíaco, hecho que parece claro cuando existe una patología cardíaca de base.



rias o las canalopatías (disfunción de los canales iónicos en las membranas de los miocitos; entre ellas el síndrome de Brugada, descrito por uno de los autores del presente artículo). En sujetos de más edad, la patología coronaria arteriosclerótica, debida al endurecimiento y estrechamiento de las arterias coronarias, constituye la causa principal de muerte súbita.

La relación causal entre el deporte y la muerte súbita es aún controvertida. Según un estudio realizado en Italia, país con una amplia experiencia en el campo de la cardiología deportiva, cuando la población se divide en deportistas y no deportistas, la incidencia de muerte súbita es casi el triple en los primeros que en los segundos. También se debate sobre el papel que pueden desempeñar en estas arritmias malignas las drogas e incluso ciertos fármacos, como los utilizados para el tratamiento del trastorno de déficit de atención, una situación no infrecuente en la población de niños y adolescentes deportistas. Por otra parte, es bien conocido que existen patologías cardíacas en las que el esfuerzo puede conducir al colapso cardíaco por la aparición de arritmias malignas, al suponer un aumento de la demanda hemodinámica y una descarga adrenérgica. Por tanto, hay que pensar que el ejercicio actúa al menos como un generador de fenómenos arrítmicos en sujetos con una patología cardíaca de base.

El hecho de que existan cambios estructurales cardíacos causados por el entrenamiento y que estos sean reversibles con el desentreno plantea la duda de si el ejercicio crónico podría favorecer un sustrato favorable para generar trastornos del ritmo eléctrico del corazón (arritmias). Un corazón dilatado e hipertrófico es, por definición, un órgano arritmogénico. Gracias al uso de técnicas de resonancia magnética cardíaca con contraste, se ha observado que algunos deportistas presentan pequeñas zonas con fibrosis (sustitución patológica de tejido muscular por colágeno) en el miocardio. Estas son responsables de las arritmias en algunas enfermedades cardíacas, como el infarto.

Con el fin de demostrar la relación causal entre fibrosis y génesis de arritmias en sujetos deportistas, nuestro grupo ha realizado diversos estudios en un modelo experimental con ratas sometidas a un programa de entrenamiento intensivo (cinta sin fin). En estos experimentos se ha observado que las ratas entrenadas muestran, además de una mayor hipertrofia y dilatación cardíaca, una zona fibrótica en el tejido miocárdico de ambas aurículas y del ventrículo derecho, junto con una mayor tendencia a sufrir arritmias ventriculares. Además, se ha comprobado que, si se establece un período de descanso tras

el entrenamiento, se reduce la extensión de la fibrosis.

MEDIDAS PREVENTIVAS

La no despreciable incidencia descrita de muerte súbita entre los deportistas, su impacto sociosanitario y la posibilidad de diagnosticar, si se adoptan las medidas adecuadas, la patología que la favorece plantean la necesidad de una prevención de la muerte súbita en el ámbito del deporte. La primera medida propuesta consistiría en disponer de desfibriladores automáticos externos en los estadios y centros deportivos, además de crear espacios cardioprotegidos que incluyan la presencia de personal formado en reanimación cardiopulmonar básica. Tal medida se ha visto facilitada en los últimos tiempos gracias a la simplificación de los aparatos, que casi no requieren ninguna intervención de personal y cuentan con algoritmos automatizados para hacerlos funcionar. La utilidad de los desfibriladores externos para el tratamiento de arritmias malignas y la resucitación cardiopulmonar ha sido ampliamente demostrada, pero desgraciadamente en España su disponibilidad en espacios públicos es aún limitada y, sin duda, menor que en otros países.



LA INSTALACIÓN en lugares públicos de desfibriladores automáticos de fácil manejo, como este aparato ubicado en un centro deportivo, resultaría de enorme utilidad a la hora de tratar arritmias malignas y evitar la muerte súbita.

Otra medida preventiva recomendada sería la evaluación cardiológica sistemática de los deportistas para el diagnóstico precoz de cardiopatías subyacentes; estas podrían representar la causa directa de la muerte súbita, como ocurre con determinados trastornos eléctricos (canalopatías, como el síndrome de Brugada, o la taquicardia adrenérgica), o bien favorecer las arritmias, como sucede en la hipertrofia ventricular grave. La mayoría de estas patologías no se pueden detectar antes del suceso de la muerte súbita si no se realizan exámenes específicos, pues casi todas ellas cursan sin otros síntomas hasta la presentación de una arritmia cardíaca que provoca el fallecimiento.

En Italia, desde la aplicación de un programa de cribado antes de la participación deportiva, la tasa anual de muerte súbita en atletas ha disminuido de 3,6 a 0,4 casos cada 100.000 personas al año; esta reducción se ha obtenido gracias al reconocimiento de sujetos con enfermedades cardíacas que podrían desembocar en una muerte súbita. Aunque estos datos no han sido confirmados por otros estudios y hay una gran controversia por la financiación y los recursos económicos disponibles de estos programas de evaluación sistemática, en la actualidad existe el consenso más o menos generalizado de que debe hacerse una evaluación cardiológica a los sujetos que entrenan de forma intensiva. Así, entidades como el Comité Olímpico Internacional o la FIFA aconsejan evaluar el estado de salud del corazón de sus deportistas mediante chequeos sistemáticos.

CUESTIONES PENDIENTES

A pesar de las diversas ventajas del deporte sobre la salud, queda por aclarar si existe una relación directa entre la cantidad de deporte practicado y el beneficio para la salud. El remodelado o adaptación estructural que presenta el sistema cardiovascular al entrenamiento crónico se asemeja a situaciones de enfermedad cardíaca, como la dilatación, la hipertrofia o incluso la fibrosis. Este hecho tiene dos implicaciones.

Por un lado, el facultativo que evalúa a los deportistas debería saber diferenciar bien lo que es adaptativo (normal) de lo que es patológico. Esta tarea no resulta fácil; requiere un alto nivel de experiencia en valoración de pacientes con cardiopatías y de deportistas sanos. En ocasiones, supone un auténtico reto diagnóstico aún por resolver.

Por otro lado, este solapamiento estructural entre fisiología adaptativa y enfermedad plantea la hipótesis de si el entrenamiento crónico puede originar alteraciones en el corazón que constituirían per se un sustrato para provocar arritmias y un posible riesgo para la salud. Evidentemente, la predisposición genética y personal de cada individuo siempre cumple una función y aún deben realizarse muchos más estudios para profundizar en esta hipótesis. Sin embargo, tal idea hace pensar en la necesidad de que los deportistas, en especial los que practican deportes profesionales y sobre todo los de alta exigencia física, revisen periódicamente no solo el estado de sus músculos y articulaciones, sino el de su músculo más imprescindible: el corazón.

En conclusión, a pesar de los grandes beneficios del deporte sobre la salud en general, no hay que olvidar que a la vez de promover su práctica regular y en intensidades razonables, debe difundirse la necesidad de practicarlo con seguridad. No solo deben tenerse en cuenta las condiciones externas y los lugares adecuados para realizarlo, sino también tener presente la importancia de hacerlo con un corazón sano.

PARA SABER MÁS

Physiologic left ventricular cavity dilatation in elite athletes. A. Pelliccia et al. en *Annals of Internal Medicine*, vol. 130, págs. 23-31, 1999.

Is the risk of atrial fibrillation higher in athletes than in the general population? A systematic review and meta-analysis. J. Abdulla y J. R. Nielsen en *Europace*, vol. 11, págs. 1156-1159, 2009.

Cardiac arrhythmogenic remodeling in a rat model of long-term intensive exercise training. B. Benito et al. en *Circulation*, vol. 123, n.º 1, págs. 13-22, 4 de enero de 2011.

Sports-related sudden death in the general population. E. Marijon et al. en *Circulation*, vol. 124, págs. 672-681, 2011.

Exercise-induced right ventricular dysfunction and structural remodelling in endurance athletes. A. La Gerche et al. en *European Heart Journal*, vol. 33, n.º 8, págs. 998-1006, abril de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

El corazón. *Temas de IyC* n.º 42, 2005.

SALUD

LOS BE DEL EJ







La actividad física resulta beneficiosa para el organismo

Shari S. Bassuk, Timothy S. Church y JoAnn E. Manson



PRIMEROS PASOS: En la primera década del siglo XIX, Eadweard Muybridge perfeccionó la fotografía de captura fotograma a fotograma para estudiar la locomoción humana.



NEFICIOS

por muchas razones más allá de las viejas conocidas

ERCICIO

Shari S. Bassuk es epidemióloga en el Hospital Brigham y de Mujeres e investigadora de la Escuela de Medicina de Harvard.



Timothy S. Church es titular de la cátedra John S. McIlhenny, director del Laboratorio de Investigación sobre Medicina Preventiva y profesor del Centro de Investigación Biomédica de Pennington en la Universidad estatal de Luisiana.

JoAnn E. Manson es jefa de la división de medicina preventiva en el Hospital Brigham y de Mujeres, profesora de medicina y de salud femenina en la Escuela de Medicina de Harvard, y profesora en el departamento de epidemiología de la Escuela de Salud Pública de Harvard.

TODOS SABEMOS QUE NOS CONVIENE REALIZAR ejercicio. Pero pocos somos conscientes de que su práctica es lo más importante que la mayoría podemos hacer para mejorar o mantener nuestra salud. El movimiento regular no solo disminuye el riesgo de padecer o morir a causa de una cardiopatía, un accidente cerebrovascular o diabetes, sino que también evita ciertos tipos de cáncer, mejora el estado de ánimo, fortalece los huesos y los músculos, aumenta la capacidad pulmonar, reduce el riesgo de caídas y fracturas, y ayuda a mantener el peso corporal. Y estos son solo algunos de los efectos más conocidos.

En los últimos años numerosas investigaciones han ampliado aún más la lista de beneficios. Entre otros aspectos, el ejercicio parece incrementar la capacidad intelectual (en concreto, para llevar a cabo tareas que requieren atención, organización y planificación), reduce los síntomas de la depresión y la ansiedad en algunas personas y potencia la capacidad del sistema inmunitario para detectar y defenderse de ciertos tipos de cáncer. Además, se está dando un paso más allá al describirse los efectos positivos que se producen a escala celular y molecular en ciertas enfermedades, como la ateroesclerosis y la diabetes.

Los estudios que intentan desentrañar las numerosas formas en las que el ejercicio modifica diversos sistemas de nuestro organismo (cardiovascular, digestivo, endocrino y nervioso, por nombrar algunos) revelan que los beneficios se deben sobre todo a los cambios, entre leves y moderados, en muchos aspectos de la fisiología, y no a un gran efecto sobre unos pocos procesos celulares y tisulares.

También se ha puesto de manifiesto que no se necesita ser triatleta para mejorar la salud. Hace veinte años, los expertos en medicina preventiva centraron su atención casi exclusivamente en los beneficios derivados de la actividad enérgica. Hoy, en cambio, destacan el valor de los episodios regulares de actividad moderada. El gran Estudio sobre la Salud de las Enfermeras y la Iniciativa de Salud Femenina, en los que ha participado uno de nosotros (Manson), han demostrado que el ejercicio moderado y el enérgico aportan ventajas equiparables, según se desprende de diversas variables de salud. A partir de los datos de estos y otros proyectos, las últimas directrices sobre ejercicio de los EE.UU. (publicadas en 2008) recomiendan el equivalente de al menos 30 minutos de actividad moderada, como caminar a paso ligero, cinco o más días a la semana (o 75 minutos a la semana de actividad enérgica, como correr), más 30 minutos de actividad de fortalecimiento muscular al menos dos días a la semana.

Una mirada atenta a algunos de los descubrimientos más fascinantes ofrece una idea sobre las formas menos evidentes en las que el entrenamiento protege nuestro cuerpo y lo mantiene en buen funcionamiento.

EFECTOS INMEDIATOS

Para comprender bien los últimos hallazgos, resulta útil conocer cómo responde el organismo ante el aumento de las demandas físicas. El ejercicio puede tomar diversas formas, como caminar por la nieve, nadar o caminar a un ritmo rápido por la playa, y realizarse con diferente intensidad. La actividad aeróbica aumenta de forma notable la demanda de oxígeno en los músculos, lo que exige un mayor trabajo de los pulmones. Su beneficio para la salud es el mejor conocido. Pero las formas más estacionarias de ejercicio, como el levantamiento de peso o practicar el propio equilibrio, también tienen su valor.

EN SÍNTESIS

La actividad física regular de intensidad moderada o enérgica reduce de forma notable el riesgo de fallecer a causa de una cardiopatía, accidente cerebrovascular, diabetes, cáncer y otras enfermedades.

Recientes investigaciones han revelado nuevas formas mediante las que el ejercicio habitual reduce el riesgo de cardiopatía y cáncer, ayuda a controlar la diabetes e incluso facilita el aprendizaje.

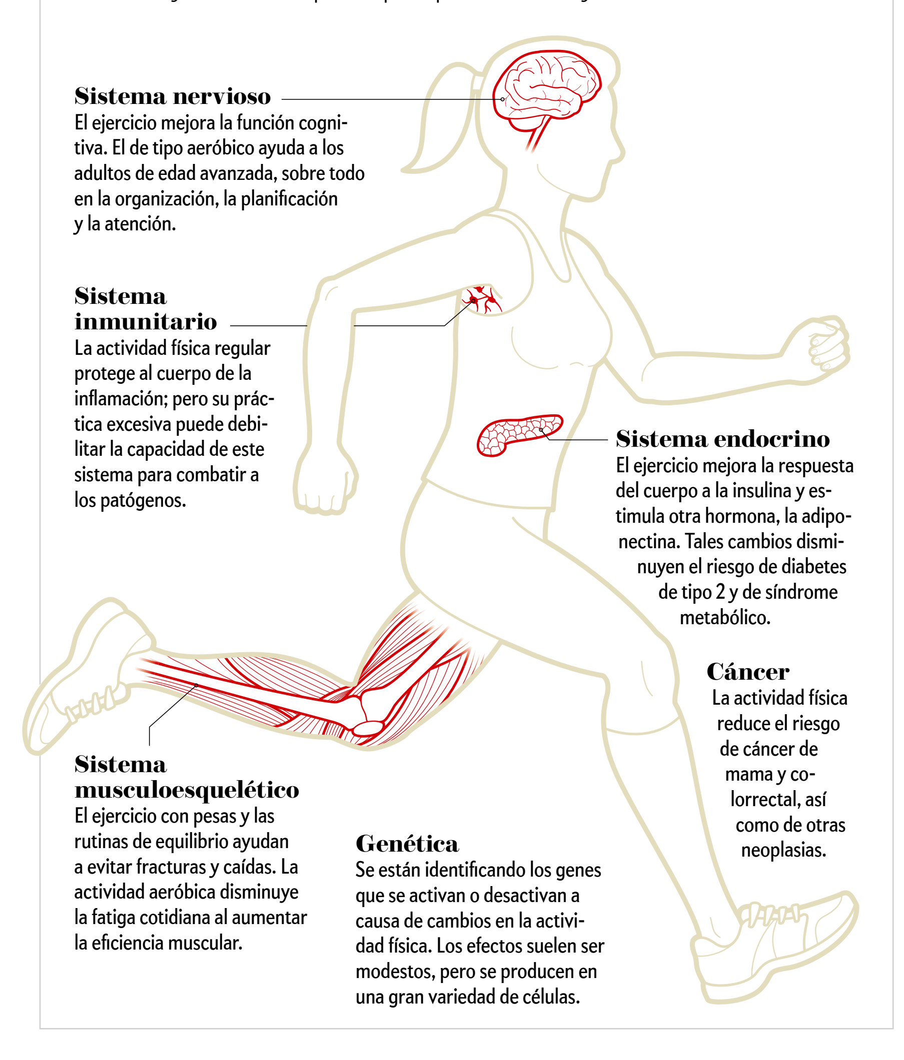
No obstante, permanecer sentado mucho tiempo puede anular algunas de las ventajas del ejercicio regular para la salud.

PÁGINAS ANTERIORES: EADWEARD MUYBRIDGE, ARCHIVOS DE LA UNIVERSIDAD DE PENSILVANIA

MÁS ALLÁ DEL CORAZÓN Y LOS PULMONES

El ejercicio favorece también otras partes del cuerpo

La mayoría de las personas desconocen que la actividad física entre moderada y enérgica cambia por completo nuestro organismo. Aquí se presenta una visión de algunos de los efectos menos conocidos, que empiezan con las conexiones neuronales del cerebro y se extienden por los principales músculos y huesos de las extremidades.



BROWN BIRD DESIGN

Se han desarrollado métodos rigurosos para medir la intensidad del ejercicio aeróbico en los laboratorios de investigación. Fuera de ellos, una forma más eficaz y menos costosa de determinar el esfuerzo que estamos realizando es la prueba del habla. La actividad moderada empieza cuando nuestro corazón comienza a latir más rápido y respiramos con mayor dificultad, aunque todavía podemos hablar o recitar un poema mientras nos movemos. Pero si solo podemos mascullar una palabra o dos a la vez, entonces nos estamos entrenando de forma enérgica. En el otro extremo de la escala, si podemos cantar mientras nos movemos, nuestro trabajo tiene un bajo nivel de intensidad.

Cuando una persona se pone en movimiento, el sistema nervioso prepara todos los órganos del cuerpo para la acción. Al principio el individuo percibe una mayor consciencia de sí mismo, un aumento de la frecuencia cardíaca, una respiración acelerada y una sudoración leve. Internamente, se reduce el flujo de sangre hacia los órganos que no son necesarios para el movimiento, como el tubo digestivo y los riñones. Al mismo tiempo, los vasos sanguíneos de los músculos activos se abren, lo que asegura el aporte hacia ellos de sangre rica en oxígeno.

Una vez en las células musculares, o miocitos, el oxígeno se difunde hasta las mitocondrias, unas estructuras que utilizan el gas para generar energía para la célula. El combustible básico de este proceso es la molécula de glucosa, que el cuerpo obtiene al descomponer partículas grandes de alimentos y que absorbe durante la digestión. La reacción del oxígeno con la glucosa en la mitocondria constituye un tipo muy eficiente de combustión. Cuando hay oxígeno, la mitocondria crea unas veinte veces más energía por molécula de glucosa que cuando no lo hay.

El organismo quema primero las moléculas de glucosa almacenadas en forma de glucógeno, un compuesto que se halla sobre todo en el hígado y en los músculos. Pero a medida que el ejercicio continúa, las existencias de glucógeno se agotan y las moléculas de triglicéridos (un tipo de grasa) se convierten en la principal fuente de combustible. Toda esta combustión interna genera varios subproductos, como el ácido láctico y el dióxido de carbono, que se difunden de los músculos al torrente circulatorio, donde son detectados por el resto del organismo. La concentración cada vez mayor de estos productos de desecho desencadena reacciones bioquímicas en el cerebro, pulmones y corazón, que en última instancia eliminan tales compuestos con mayor eficacia.

Los beneficios del ejercicio físico empiezan a notarse cuando este se convierte en un hábito rutinario. El cuerpo se adapta a las mayores demandas que el esfuerzo conlleva, lo que aumenta la resistencia de las personas a medida que el entrenamiento avanza. Así, los pulmones procesan más oxígeno al volverse más profunda la respiración y el corazón bombea más sangre con cada latido [*véase* «Adaptación cardíaca al ejercicio físico», por Marta Sitges y Josep Brugada, *en este mismo número*]. Tales adaptaciones, que suelen aparecer a las pocas semanas de cumplir o sobrepasar las directrices de EE.UU. sobre la actividad física, también originan modificaciones biológicas que mejoran la salud a largo plazo.

CAMBIOS MOLECULARES

Un sinfín de datos demuestran los efectos del ejercicio sobre casi cualquier parte de nuestro cuerpo, desde los principales sistemas de órganos hasta la activación o desactivación de ciertos genes. En la infografía que acompaña a este artículo se indican algunos de los hallazgos más importantes. Pero aquí nos centraremos en varios mecanismos recién descubiertos que ayudan a explicar por qué el entrenamiento potencia nuestras funciones cogniti-

vas, mejora nuestro control sobre la concentración de azúcar en sangre y fortalece nuestro sistema cardiovascular. Estos cambios tienen un efecto mayor sobre la calidad de vida cotidiana que casi cualquier otro beneficio del ejercicio.

Desde hace mucho tiempo, los atletas saben que el deporte mejora su estado de ánimo y su salud mental. Sin embargo, hasta 2008 no se logró medir la denominada euforia del corredor, una sensación que aparece después del ejercicio prolongado. No solo se demostró que durante una carrera de larga distancia el cerebro liberaba más endorfinas (hormonas similares a los opiáceos que evocan sensaciones de placer), sino que además estas se hallaban activas en regiones del cerebro responsables de emociones fuertes. (Los trabajos anteriores habían descrito un aumento de las endorfinas solo en el torrente circulatorio, sin relación alguna con los cambios en el cerebro.)

En tiempo reciente, las investigaciones se han centrado en las modificaciones químicas que experimenta el cerebro, en concreto las que potencian nuestra capacidad para concentrarnos, pensar y tomar decisiones. En 2011, un estudio comparativo aleatorizado en el que participaron 120 personas sexagenarias y septuagenarias reveló que el ejercicio aumentaba el tamaño de una zona del cerebro llamada hipocampo. Los autores del trabajo se percataron de que la parte del hipocampo modificada era la que permite recordar a las personas el entorno familiar; también representa una de las pocas regiones del cerebro que produce neuronas nuevas, al menos en las ratas. Se cree que las células recién formadas ayudan a distinguir acontecimientos o informaciones que se asemejan entre sí. Además, los estudios con animales han demostrado que el ejercicio aumenta los niveles del factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF, por sus siglas en inglés), una molécula que estimula el crecimiento de las neuronas nuevas.

Las investigaciones actuales están poniendo en entredicho la idea que se tenía sobre el modo en que el ejercicio regular previene las cardiopatías. En un principio se pensaba que este reducía el riesgo cardiovascular principalmente porque hacía disminuir la presión arterial y la cantidad en sangre de colesterol de las lipoproteínas de baja densidad (LDL, por sus siglas en inglés), conocido como también colesterol «malo», al tiempo que hacía aumentar el colesterol de las lipoproteínas de alta densidad (HDL), el colesterol «bueno». Esta conclusión era correcta, pero solo en parte. De hecho, la actividad física disminuye de forma notable la presión arterial en algunas personas, pero en la mayoría tal beneficio resulta pequeño. Además, si bien el ejercicio (sobre todo el de resistencia, como el entrenamiento con peso) puede aumentar el colesterol de las HDL —un cambio que suele tardar varios meses en aparecer—, el efecto es modesto, del orden de unos pocos puntos porcentuales.

Una investigación posterior ha revelado que el efecto más importante relacionado con el colesterol de las LDL se debe a un cambio en sus propiedades moleculares, y no a una reducción de su cantidad en la sangre. Las LDL transportan el colesterol a través del torrente circulatorio igual que un camión de reparto lleva alimentos. (Al tratarse de un lípido, el colesterol no se disuelve en el entorno acuoso de la sangre, por lo que debe empaquetarse en una sustancia que sí lo haga.) Además, las partículas de LDL se presentan en diversos tamaños, del mismo modo que los alimentos pueden distribuirse en furgonetas o bien en camiones enormes.

Durante los últimos años, numerosos científicos han descubierto que las moléculas más pequeñas de LDL conllevan un especial riesgo para la salud. Tienden a perder electrones que luego rebotan por los vasos sanguíneos, lo que daña a otras moléculas y células (piénsese en un conductor loco al volante de una furgoneta destartalada). En cambio, las moléculas voluminosas de LDL son mucho más estables y flotan por el torrente circulatorio sin chocar con nada (de forma parecida a los grandes camiones que presentan un buen mantenimiento y son dirigidos por conductores profesionales).

Los estudios han demostrado ahora que el ejercicio aumenta el número de las moléculas de LDL grandes y seguras, al tiempo que disminuye el de las pequeñas y peligrosas; altera la proporción entre ambas al promover la actividad de una enzima llamada lipoproteinlipasa en los tejidos adiposo y muscular. De este modo, dos personas con la misma cantidad de colesterol en la sangre pero diferente nivel de actividad física podrían poseer un perfil de riesgo cardiovascular muy distinto. Probablemente, el adicto a la televisión contará con muchas LDL pequeñas y muy pocas o ninguna de las grandes, mientras que en la sangre de una persona activa predominarán las LDL voluminosas. A pesar de presentar niveles idénticos de colesterol, el primer individuo tendrá un riesgo varias veces superior de sufrir un ataque cardíaco que el segundo.

En nuestros hábitos diarios y en nuestro entorno físico corriente necesitamos integrar el movimiento regular y prolongado, practicado en cualquier grado de intensidad de forma segura

La actividad física regular ejerce un efecto positivo sobre otro componente clave de la sangre: la glucosa. Normalmente, el hígado, el páncreas y los músculos esqueléticos (los encargados de mover la cabeza, brazos, piernas y torso) trabajan coordinados para asegurar el aporte de azúcar al cuerpo, se halle este en reposo o activo. Por definición, el ejercicio aumenta las demandas de los músculos esqueléticos, que necesitan cantidades crecientes de glucosa para sostener el esfuerzo. A largo plazo, también mejora la eficiencia de las fibras musculares en el uso de la glucosa, con lo que estas se fortalecen.

El hígado responde de inmediato a la mayor necesidad de combustible con un aporte de glucosa al torrente circulatorio; y el páncreas libera una hormona llamada insulina, que indica a las células que extraigan mayores cantidades de glucosa de la sangre. Se podría pensar que el proceso conjunto provocará cambios bruscos en los niveles de azúcar, especialmente después de una comida o de una carrera; pero el cuerpo se esfuerza por mantener unos valores en sangre dentro de un intervalo bastante estrecho, entre los 70 y 140 miligramos por decilitro (y muy por debajo de los 126 en ayunas), al menos en las personas que no padecen diabetes. Una de las razones por las que el valor debe mantenerse por encima de los 70 miligramos por decilitro es que el cerebro depende en gran medida de la glucosa como fuente principal de combustible y, por tanto, se muestra muy sensible a cualquier cambio de su cantidad en la sangre.

Aunque los niveles sumamente bajos pueden llevar al coma y a la muerte en cuestión de minutos, desde un punto de vista fisiológico resulta igualmente importante no alcanzar durante largos períodos los valores del extremo superior. En términos generales, el exceso de azúcar tiende a alterar el funcionamiento de las células y provoca en ellas un envejecimiento prematuro.

A medida que el ejercicio se convierte en un hábito diario, los músculos se vuelven más sensibles a los efectos de la insulina. Ello significa que el páncreas no debe trabajar tanto para ayudar a mantener los niveles de glucosa bajo control. De este modo, una baja concentración de insulina originará el mismo efecto que el obtenido antes con una concentración superior. Realizar más trabajo con menos insulina resulta de especial utilidad para las personas con diabetes de tipo 2, a quienes les cuesta mantener los valores de glucosa dentro del intervalo normal, en gran medida porque se han vuelto resistentes a los efectos de la hormona. Sin embargo, la insulina también promueve la proliferación celular, por lo que su elevada concentración se ha asociado a un mayor riesgo de cáncer de mama y de colon.

En tiempo reciente se ha demostrado que la actividad física favorece la captación de glucosa a través de otra vía que no requiere la presencia de insulina. Disponer de una segunda vía para extraer la glucosa del torrente circulatorio e introducirla en los miocitos podría dar lugar a nuevas estrategias terapéuticas contra la diabetes.

Curiosamente, los diabéticos parecen obtener un mayor beneficio cuando practican diferentes tipos de entrenamiento. Dos grandes ensayos clínicos aleatorizados han informado que la combinación de ejercicio aeróbico y de resistencia permite controlar mejor los niveles de glucosa en sangre que cualquiera de ambos por separado. Sin embargo, el primer estudio se realizó de tal manera que no resultaba claro si la mejoría se debía al efecto de los ejercicios combinados o al hecho de que los participantes acababan ejercitándose durante más tiempo que sus homólogos que seguían un único programa. Uno de nosotros (Church) decidió abordar esta pregunta en un segundo ensayo en el que distribuyó a 262 hombres y mujeres diabéticos previamente sedentarios en cuatro grupos: uno de ellos practicó ejercicio aeróbico (caminar sobre una cinta sin fin); otro, ejercicio de resistencia (remo bajo techo, prensas de piernas y similares); otro, ambos combinados; y, por último, el grupo de control realizó estiramientos semanales y clases de relajación.

Los grupos que emprendieron una actividad física dedicaron el mismo tiempo y esfuerzo (unos 140 minutos por semana) a lo largo de nueve meses. Todos ellos redujeron el diámetro de la cintura. Los dos grupos que realizaron ejercicio aeróbico se pusieron más en forma. Sin embargo, solo el que siguió ejercicios de resistencia y aeróbicos combinados experimentó un descenso notable en la concentración sanguínea de HbA1c, una proteína indicadora del valor promedio de glucosa en sangre durante los últimos meses. Tal beneficio hace pensar que uno y otro tipo de entrenamiento operan a través de mecanismos fisiológicos diferentes, una idea en la que trabajan los expertos del Centro de Investigación Biomédica Pennington en Baton Rouge, Luisiana, y de otros lugares.

El ejercicio continuado fortalece también los músculos al promover la formación de mitocondrias, generadoras de energía. En respuesta al ejercicio regular, los miocitos empiezan a producir PGC-1α, una proteína que empuja a las células a producir mitocondrias nuevas. Como consecuencia, cada célula convierte más glucosa en energía, lo que aumenta la fuerza y la resistencia a la fatiga de todo el músculo.

EL PELIGRO DE ESTAR SENTADO

Dados los múltiples beneficios del ejercicio moderado, cabría esperar que la mayoría de la población estuviera dispuesta a practicarlo. Pero muchos estadounidenses no alcanzan ni siquiera la media hora recomendada de actividad moderada cinco o más días a la semana. Solo un 52 por ciento de los adultos cumplen la directriz del ejercicio aeróbico; y un 29 por ciento fortalecen sus músculos 30 minutos dos veces a la semana según lo recomendado. Uno de cada cinco individuos sigue los consejos relativos al ejercicio aeróbico y de resistencia.

La dificultad de cambiar los hábitos sedentarios de la población ha llevado a investigar si los episodios más ligeros o más cortos de ejercicio resultan igualmente provechosos para la salud. Se espera que la obtención de resultados positivos motive incluso a los teleadictos a moverse más. Hasta ahora, los datos indican que las rutinas diarias de ejercicio, incluso mínimas, pueden prolongar en cierta medida la vida de las personas. Un análisis de 2012 de los datos de seis estudios, con un total de 655.000 adultos estadounidenses a los que se siguió durante diez años, reveló que los que dedicaban tan solo 11 minutos al día a actividades tranquilas (jardinería, lavar el coche, dar un paseo por la noche) poseían una esperanza de vida de 1,8 años superior después de los 40 años que sus compañeros inactivos. Sin duda, los participantes que cumplían las recomendaciones relativas a la actividad moderada presentaban aún mejores resultados, con una esperanza 3,4 años mayor. Y a estos todavía les superaban los que estuvieron activos entre 60 y 90 minutos al día (4,2 años más de esperanza de vida).

A pesar de las ventajas que aporta un esfuerzo mínimo, un examen conjunto de los estudios realizados hasta la fecha sobre los efectos del ejercicio revela que la mayoría de las personas se beneficiarían de un aumento gradual en su actividad (como añadir una actividad moderada si se ejercitan de forma leve o episodios cortos de actividad enérgica si se ejercitan de forma moderada). Quizá la peor noticia para las profesiones que requieren trabajar en una oficina o despacho, es que permanecer sentado más de seis horas al día durante el tiempo de ocio puede resultar perjudicial incluso si se practican algunos ejercicios de alta intensidad. Todavía no se sabe si el problema guarda relación con el hecho de estar sentado en sí mismo o con la falta de movimiento asociado a esta actitud.

De la evidencia creciente de los beneficios de la actividad física sobre la salud se desprende un mensaje claro. En nuestros hábitos diarios y en nuestro entorno físico corriente necesitamos integrar el movimiento regular y prolongado, practicado en cualquier grado de intensidad de forma segura. Debería resultar tan fácil como lo es ahora subirse a un coche.

Recomendamos encarecidamente que los médicos y otros profesionales de la salud prescriban el ejercicio físico en las visitas de rutina al consultorio. Además, abogamos por una mayor investigación sobre distintos programas de comportamiento, campañas de salud pública y cambios en el diseño urbano que faciliten la actividad física sostenida en nuestra sociedad mayoritariamente sedentaria.

PARA SABER MÁS

Recomendaciones mundiales sobre actividad física para la salud. Organización Mundial de la Salud, 2010. **whqlibdoc.who.int/publications/2010/9789243599977_spa.pdf**

Directrices sobre actividad física para los estadounidenses: **www.health.gov/paguidelines**

EVOLUCIÓN

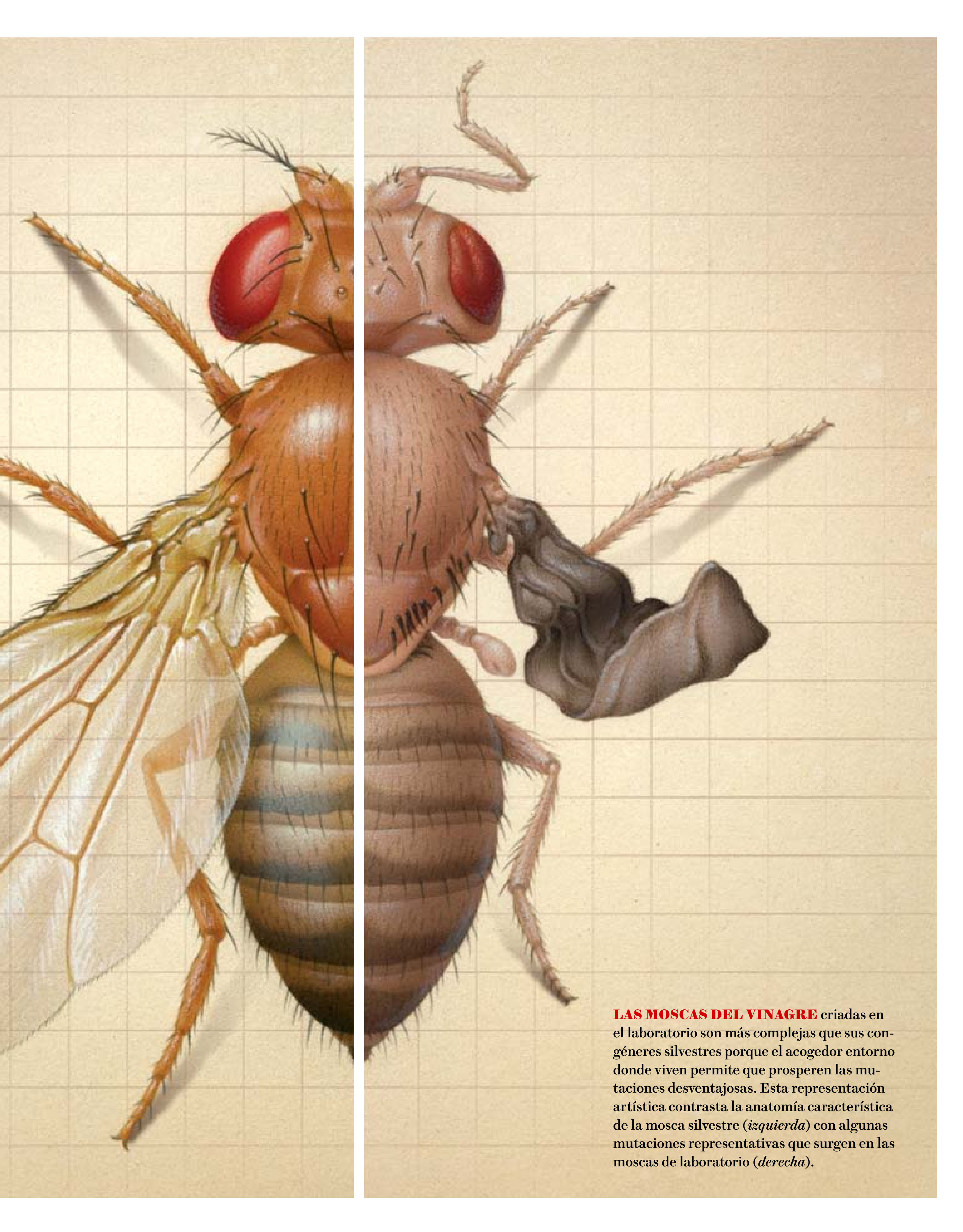
ORÍGENES DE LA COMPLEJIDAD BIOLÓGICA

¿De qué modo pueden los seres vivos crear estructuras refinadas sin selección darwinista?

Carl Zimmer

CHERIE SINNEN





LAS MOSCAS DEL VINAGRE criadas en el laboratorio son más complejas que sus congéneres silvestres porque el acogedor entorno donde viven permite que prosperen las mutaciones desventajosas. Esta representación artística contrasta la anatomía característica de la mosca silvestre (*izquierda*) con algunas mutaciones representativas que surgen en las moscas de laboratorio (*derecha*).

Carl Zimmer es columnista del *New York Times* y autor de numerosos libros, entre ellos *Evolution: Making sense of life*, escrito en colaboración con Douglas J. Emlen.



Charles Darwin no había cumplido la treintena cuando concibió la idea básica de la teoría de la evolución, pero no presentó sus argumentos al mundo hasta recién entrado en los cincuenta. Dedicó dos décadas de su vida a recopilar con meticulosidad pruebas para su teoría y a proponer respuestas para todos los argumentos en contra que pudo imaginar. Y la principal objeción que previó fue que el proceso evolutivo gradual que había imaginado no podría generar ciertas estructuras complejas.

Piénsese en el ojo humano. Las numerosas partes que lo componen (retina, cristalino, músculos, humor vítreo, etcétera) tienen que interactuar para hacer posible la visión. Si una de ellas sufre daños (por ejemplo, la retina se desprende) puede sobrevenir la ceguera. Y es que el ojo solo ve si el tamaño y la forma de sus componentes encajan a la perfección. Si Darwin estaba en lo cierto, el ojo complejo tuvo que evolucionar a partir de antecesores sencillos. En *El origen de las especies*, él mismo admitió que esa idea le parecía absurda en todo punto.

Pero, a pesar de todo, Darwin supo ver un camino para la evolución de la complejidad. En cada generación, los rasgos de los individuos experimentaban cambios. Algunos de ellos habrían mejorado las posibilidades de supervivencia y permitido engendrar más descendencia. Con el paso de las generaciones, las variaciones ventajosas se harían más frecuentes, en una palabra, serían «seleccionadas». A medida que surgieron y se difundieron las nuevas variaciones, fueron retocando gradualmente la anatomía y se formaron estructuras complejas.

Darwin sostenía que el ojo humano podría haber evolucionado a partir de un sencillo agregado de células captadoras de luz similar al que poseen algunos animales simples, como los gusanos planos. La selección natural habría convertido esta zona en una cavidad capaz de percibir la dirección de la luz. Entonces, algún elemento añadido mejoró la visión brindada por la cavidad, lo que facilitó la adaptación del animal a su entorno e hizo perpetuar en las generaciones futuras ese precursor intermedio del ojo. De este modo, paso a paso, la selección natural llevó tal transformación hacia una mayor complejidad, puesto que cada forma intermedia debió conferir una ventaja respecto a las anteriores.

Las reflexiones de Darwin sobre el origen de la complejidad han recibido el apoyo de la biología moderna. Los biólogos de hoy examinan el ojo y otros órganos hasta la escala molecular, lo que les ha permitido descubrir proteínas sumamente complejas que se ensamblan en estructuras de asombrosa semejanza con portales, cintas transportadoras y motores. Estos intrincados sistemas de proteínas habrían procedido de otros más sencillos; a lo largo del camino, la selección natural habría favorecido otros sistemas intermedios.

Pero en fecha reciente, algunos científicos y filósofos han sugerido que la complejidad podría surgir por otros cauces. Hay quien afirma que la vida tiene la tendencia intrínseca a ganar complejidad con el tiempo. Otros mantienen que esta puede emerger como un efecto secundario de las mutaciones al azar, sin que la selección natural intervenga en absoluto. La complejidad, afirman, no es el mero fruto de millones de años de

EN SÍNTESIS

El conocimiento tradicional sostiene que las estructuras complejas evolucionan a partir de otras más sencillas, paso a paso, a través de un proceso evolutivo gradual en el que la selección darwinista favorece las formas intermedias.

Pero en tiempo reciente algunos expertos han propuesto que la complejidad puede surgir por otros medios (tal vez como un efecto secundario), sin que la selección natural la promueva.

Algunos estudios indican que las mutaciones aleatorias que de forma individual no afectan a un ser vivo pueden propiciar la aparición de complejidad, en un proceso denominado evolución constructiva neutra.

refinamiento logrado a través de la selección natural, el proceso que Richard Dawkins bautizó con fortuna como «el relojero ciego». Hasta cierto punto, simplemente ocurre.

LA SUMA DE VARIAS PARTES

Biólogos y filósofos llevan décadas meditando sobre la evolución de la complejidad, pero en opinión de Daniel W. McShea, paleobiólogo de la Universidad Duke, han andado renqueando con definiciones vagas. «No solo no saben cómo cifrarla. Tampoco saben lo que quieren decir con esa palabra», asegura.

McShea ha estado analizando la cuestión durante años, en estrecha colaboración con Robert N. Brandon, de su misma universidad. Ambos sugieren que nos fijemos no solo en el enorme número de partes que componen los seres vivos, sino también en los tipos de partes. El cuerpo humano está formado por 10 billones de células. Si todas resultaran iguales, seríamos una masa informe de protoplasma. En cambio, poseemos células musculares, glóbulos rojos, células cutáneas y un largo etcétera. Un solo órgano puede albergar muy diversos tipos de ellas. Sin ir más lejos, la retina contiene unos 60 tipos de neuronas, cada uno con una tarea distinta. Con ese razonamiento, podemos afirmar que el ser humano es más complejo que una esponja, la cual apenas contiene unos seis tipos celulares.

Una ventaja de esta definición es que permite medir la complejidad de morfologías muy diversas. El esqueleto está compuesto por distintos tipos de huesos, cada uno con su forma peculiar. Incluso la columna vertebral presenta diferentes elementos óseos, desde las vértebras del cuello que sostienen el cráneo hasta las que cierran la caja torácica.

En su libro de 2010, *Biology's first law* («La primera ley de la biología»), McShea y Brandon explican a grandes rasgos un modo en que pudo surgir la complejidad acorde con esa definición. Cada vez que un ser vivo se reproduce, alguno de sus genes puede mutar. Y en ocasiones estas mutaciones generan nuevos tipos de partes. Una vez adquiridas por el organismo, estas unidades tienen la oportunidad de volverse diferentes. Si un gen se duplica por accidente, la copia puede sufrir otras mutaciones distintas de las del gen original. De este modo, si se empieza con un conjunto de partes idénticas, estas tenderán a diversificarse cada vez más. En otras palabras, la complejidad del organismo aumentará.

La adquisición progresiva de complejidad podría ayudar al organismo a sobrevivir más tiempo o a engendrar más descendencia. Si es así, se verá favorecida por la selección natural y se extenderá por la población. Un ejemplo lo hallamos en los receptores olfativos situados en las terminaciones nerviosas de la nariz de los mamíferos, que captan las moléculas olorosas. Los genes de los receptores se han duplicado repetidamente a lo largo de millones de años y las nuevas copias han mutado, lo que ha permitido a los mamíferos percibir multitud de olores. Los animales dotados de un olfato agudo, como los ratones o los perros, poseen más de un millar de tales genes. Pero la complejidad a veces se convierte en un lastre. Las mutaciones pueden cambiar la forma de una vértebra cervical y dificultar el giro de la cabeza. La selección natural impedirá que tales mutaciones se difundan al resto de la especie. Es decir, los organismos nacidos con esos rasgos tenderán a morir antes de procrear y los rasgos deletéreos quedarán fuera de circulación. En casos así, la selección natural actúa contra la complejidad.

A diferencia de la teoría evolutiva ortodoxa, McShea y Brandon creen que la complejidad aumenta incluso en ausencia de selección natural. Según ellos, esta afirmación corresponde a una ley fundamental de la biología, la única tal vez. La han bautizado con el nombre de ley evolutiva de fuerza cero.

LA PRUEBA DE LA MOSCA DEL VINAGRE

Hace poco, McShea y Leonore Fleming, estudiante de la Universidad Duke, pusieron a prueba la ley evolutiva de fuerza cero en moscas *Drosophila*, un insecto que se cría desde hace más de un siglo para hacer experimentos. En el laboratorio, las moscas disfrutan de una vida acomodada y reciben alimento a todas horas en un entorno estable y cálido. Sus homólogas silvestres, en cambio, han de soportar hambre, frío y calor y vérselas con los depredadores. La selección natural es rigurosa con ellas y elimina las mutaciones que les impiden afrontar las numerosas adversidades. Pero en el acogedor ambiente del laboratorio la selección natural actúa con blandura.

La ley evolutiva de fuerza cero hace una predicción clara: durante el último siglo las moscas de laboratorio apenas se han visto obligadas a eliminar las mutaciones desfavorables y deberían ser más complejas que las silvestres.

Fleming y McShea han examinado la bibliografía relativa a 916 linajes de moscas de laboratorio y han obtenido numerosas medidas de la complejidad en cada población. Sus conclusiones, publicadas en la revista *Evolution & Development*, confirman que las moscas de laboratorio son más complejas que las silvestres. Algunos insectos poseían patas deformes, otros habían adquirido complejos patrones de colores en las alas. Los segmentos de las antenas habían adoptado formas diversas. Liberadas de la selección natural, las moscas se recrearon en la complejidad, tal y como predice la ley.

Pese a que algunos biólogos han apoyado esta ley, Douglas Erwin, prestigioso paleontólogo del Museo Smithsoniano de Historia Natural, cree que adolece de graves defectos. «Una de sus

Algunos insectos poseían patas deformes, otros habían adquirido complejos patrones de colores en las alas. Los segmentos de las antenas habían adoptado formas diversas. Liberadas de la selección natural, las moscas se recrearon en la complejidad

¿Cuán perfecta es la forma de los animales?

Un modelo de simulación predice la evolución de estructuras complejas según distintas hipótesis de selección natural

ISAAC SALAZAR CIUDAD Y MIQUEL MARÍN-RIERA

Ante la pregunta de por qué los animales tienen la forma que tienen, a menudo se recurre a explicaciones basadas en una perspectiva adaptacionista, que considera que la mayoría de rasgos son adaptaciones óptimas alcanzadas por selección natural; o incluso, fuera de la biología y la ciencia, se defiende que existe un diseño preestablecido, según el cual cada detalle del cuerpo está hecho para cumplir algún tipo de función con una eficiencia que a veces se supone inmejorable.

En la teoría evolutiva, se acepta de forma generalizada que los organismos evolucionan a lo largo del tiempo debido a que la selección natural actúa sobre la variación heredable que aparece en cada generación. Ello no implica que todos los aspectos de la morfología o, en general, del fenotipo de un organismo sean adaptativos (es decir, debidos a la selección natural). Se sabe que numerosos rasgos del fenotipo se deben a otros procesos, entre ellos los efectos colaterales neutros del desarrollo embrionario de caracteres que sí son adaptativos (como es el caso del apéndice en el intestino grueso humano, un vestigio del ciego que ayuda a la digestión de la celulosa en numerosos herbívoros).

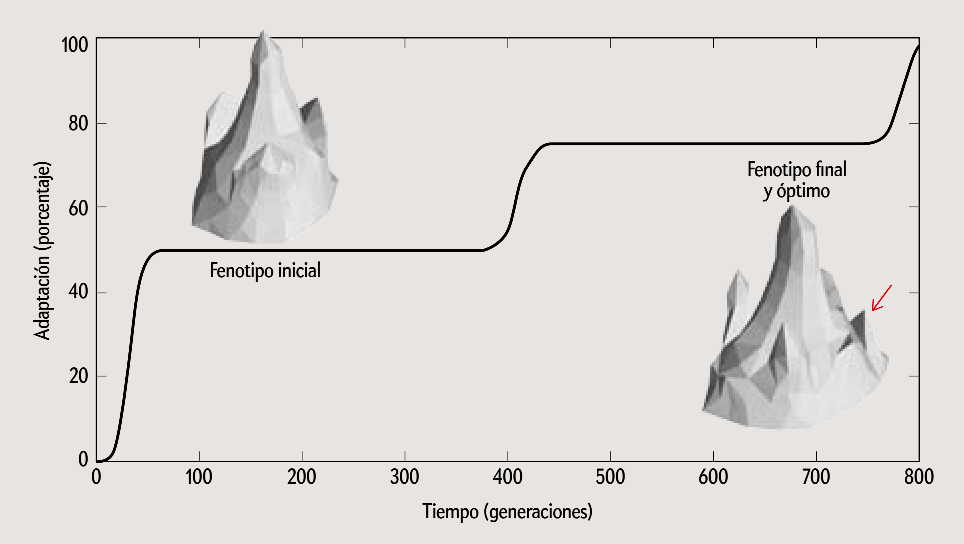
Sin embargo, resulta difícil determinar qué proporción de los caracteres de los organismos se originan por una selección natural detallista (que actuaría en todos los detalles de un rasgo), por una selección más grosera (que solo tendría en cuenta algunos detalles) y cuáles no se explican por selección directa, sino holística (en la que el valor adaptativo depende de una medida global e integradora de todos los rasgos). En otras palabras, ¿cuán perfectos son los organismos a causa de la selección natural?

Desde hace algún tiempo hemos intentado responder a esta pregunta de forma cuantitativa mediante nuevos modelos informáticos de evolución basados en los recientes avances en biología del desarrollo y evolución.

Del genotipo al fenotipo

Para abordar la cuestión planteada arriba, antes es necesario responder a otras dos preguntas: ¿qué rango de variaciones fenotípicas pueden aparecer por mutación en cada generación?, y ¿qué aspectos del fenotipo se seleccionan en la naturaleza? Proponemos que ambas preguntas guardan una relación estrecha.

La selección natural no actúa directamente sobre la genética de los organismos, sino sobre el fenotipo, ya sea a nivel morfológico, fisiológico, comportamental u otros. Debido a que diferentes variantes genéticas conllevan variaciones en el fenotipo,



Progresión temporal de una simulación de la evolución de la forma de los dientes de mamíferos. **En este ejemplo se considera que la selección natural actúa de forma holística, esto es, sobre el conjunto de los rasgos morfológicos del diente. El eje vertical indica el porcentaje promedio de adaptación de la población respecto a un óptimo funcional; el horizontal, el tiempo transcurrido. La selección holística tiende a aumentar el grado de rugosidad del diente, lo que da lugar a la aparición de nuevas cúspides. Si se compara el fenotipo inicial (*izquierda*) con el final (*derecha*), se aprecia la aparición de una pequeña cúspide en la parte derecha del diente (*flecha*). Este aumento de la rugosidad facilita el procesamiento y la posterior digestión de los alimentos y, por consiguiente, confiere una ventaja adaptativa al individuo. La selección holística introducida en el modelo es la que mejor explica la formación de los órganos complejos.**

CORTESÍA DE LOS AUTORES

premisas básicas resulta errónea», aduce. Según la ley, la complejidad puede aumentar en ausencia de selección. Pero tal situación solo podría darse si los seres vivos pudieran existir al margen de la selección. Erwin sostiene que, por muy mimadas que estén a manos de los científicos, las moscas siguen sometidas al influjo de ella. Para que un animal como una mosca se desarrolle correctamente, cientos de genes deben interactuar de forma complicada para convertir una célula en muchas otras, las cuales darán lugar a tejidos, órganos y así sucesivamente. Las mutaciones pueden trastocar esa interacción e impedir que la mosca alcance la edad adulta.

Un organismo puede existir sin selección externa, sin un entorno que determine quién gana y quién pierde en la carrera evolutiva. Pero aun así estará sometido a la selección interna,

los genes son seleccionados de forma indirecta y se transmiten de generación en generación (solo el genotipo se hereda). Sin embargo, la relación entre el genotipo y el fenotipo es compleja. Sabemos que determinados genes tienen que ver con ciertas variantes fenotípicas, pero, en general, los conocimientos actuales no permiten predecir cómo variará el fenotipo cuando cambien estos genes. Entender la relación entre el genotipo y el fenotipo, es decir, establecer el mapa genotipo-fenotipo, es uno de los retos más importantes de la biología actual, con implicaciones en diversos conceptos y disciplinas científicas, entre ellos la evolución, la fisiología, la medicina y la neurociencia. En el caso de la morfología, este mapa se explica por los mecanismos de desarrollo embrionario.

La morfología se genera durante el desarrollo embrionario mediante interacciones entre distintos genes, entre genes y células, y entre células. Estas redes de interacción resultan complejas, pero en algunos casos se conocen suficientemente como para poder predecir cómo se produce la forma y cómo cambia esta cuando los genes varían. Tales predicciones se realizan con modelos biomatemáticos que implementan las interacciones en el contexto espacial y temporalmente dinámico del embrión en desarrollo.

En un estudio publicado en 2010 en la revista *Nature*, uno de los autores (Salazar) y Jukka Jernvall, de la Universidad de Helsinki, concibieron uno de estos modelos, el cual permitió simular la formación de los dientes en los mamíferos. Al integrar los conocimientos de los últimos treinta años sobre el desarrollo de los dientes, el modelo predijo cómo cambiaba su forma en 3D durante el crecimiento y cuál era la morfología final alcanzada. No solo describió la formación de un diente normal, sino también su variación en poblaciones naturales.

Un modelo de evolución

Basándonos en el modelo de formación de los dientes descrito arriba (modelo de desarrollo) como un ejemplo paradigmático de lo que se entiende por mapa genotipo-fenotipo, los autores de esta nota hemos concebido un nuevo modelo para simular la evolución de órganos complejos. En él aplicamos la selección natural a la variación generada por el modelo de desarrollo en cada individuo de una población (una vez por generación). Publicamos los resultados en la revista *Nature* en mayo de 2013.

El modelo incluye individuos con un genotipo que puede mutar; un proceso de desarrollo embrionario, por el que el genotipo da lugar a una morfología; y la selección natural, que actúa sobre esta morfología. La selección determina qué individuos contribuyen con descendencia a la siguiente generación.

Además, el modelo contempla tres hipótesis de selección natural. La primera, la selección detallista o precisa, implica que todos los caracteres contribuyen por igual a la adaptación. Por caracteres entendemos todos aquellos aspectos de una morfología que se pueden medir; en el caso de nuestro modelo, la posición de cada célula en una determinada estructura del organismo. Ello significa que en el fenotipo óptimo cada célula debe ocupar una posición concreta respecto a las otras partes. Cualquier desviación de esta posición conllevaría un descenso proporcional del valor adaptativo o eficacia biológica (*fitness*) del individuo; por tanto, solo existiría una forma óptima. La segunda hipótesis plantea la existencia de una selección grosera, en la que solo algunos caracteres de referencia (entre dos y trece) contribuirían a la eficacia biológica. La tercera hipótesis propone que la selección natural es holística, es decir, que actúa sobre características globales del fenotipo sin tener en cuenta sus partes por separado ni la posición de ninguna célula en particular. En el ejemplo de los dientes, diferentes morfologías podrían originar el mismo grado de rugosidad y, por tanto, tendrían el mismo valor adaptativo.

Nuestro estudio demuestra que, dado un modelo realista del mapa genotipo-fenotipo como el nuestro, solo algunas de estas hipótesis son posibles. El mapa resulta demasiado complejo para que la selección natural pueda producir evolución si se fija en todos los caracteres (hipótesis detallista), o incluso en numerosos caracteres (más de ocho, en la hipótesis de la selección grosera). Ello se debe a que, en el modelo considerado, muchos individuos solo dan lugar a descendencia con fenotipos menos adaptativos que el suyo. Como consecuencia, la evolución suele estancarse.

En cambio, en las simulaciones donde aplicamos la selección holística todos los linajes llegan al valor adaptativo óptimo. En este caso, el efecto de la complejidad del mapa genotipo-fenotipo observado se ve atenuado, ya que muchas variantes morfológicamente distintas tendrán el mismo grado de rugosidad y, por consiguiente, el mismo valor adaptativo. De este modo, los linajes pueden seguir múltiples trayectorias adaptativamente neutras o ligeramente adaptativas que les conducirán, tarde o temprano, al óptimo adaptativo sin caer en un callejón sin salida.

Así pues, nuestros resultados indican que los órganos complejos pueden evolucionar de forma eficaz mediante selección natural, pero solo en el caso de que esta actúe de forma holística o sobre pocos aspectos de la morfología de un órgano a la vez. De este modo, la función adaptativa del órgano no dependerá de la contribución de los distintos caracteres por separado, de forma perfeccionista, sino de una medida compleja e integradora de todos ellos.

Isaac Salazar Ciudad *es investigador del Instituto de Biotecnología de la Universidad de Helsinki y del departamento de genética y microbiología de la Universidad Autónoma de Barcelona.* ***Miquel Marín-Riera*** *es estudiante de doctorado de este departamento.*

que tiene lugar en el seno de los seres vivos. En opinión de Erwin, el nuevo estudio de McShea y Fleming no aporta ninguna prueba convincente de la ley evolutiva de fuerza cero porque los autores solo contemplan las variantes que llegaron a la edad adulta. No tienen en cuenta los mutantes que murieron antes de alcanzar la madurez a causa de trastornos del desarrollo, pese a haber sido criados por científicos.

Otra objeción esgrimida por Erwin y otros críticos es que la versión de la complejidad de McShea y Brandon no concuerda con la definición aceptada por la mayoría. Al fin y al cabo, el ojo no solo se limita a tener múltiples partes. Estas también desempeñan una tarea conjunta y cada una de ellas cumple un cometido concreto. Pero McShea y Brandon alegan que el tipo de complejidad que están examinando podría conducir a comple-



EL OJO HUMANO adquirió complejidad de una manera clásica, en un largo proceso gradual durante el cual la selección natural favoreció formas intermedias. Sin embargo, los estudios con moscas del vinagre y otros organismos indican que la complejidad también puede surgir por otros cauces.

SUREN MANVELYAN

jidades de otra naturaleza. La que observan en la población de *Drosophila*, según ellos, es el fundamento de aspectos realmente interesantes de los que la selección se podría apropiar para construir estructuras avanzadas que favorecen la supervivencia.

COMPLEJIDAD MOLECULAR

Como paleobiólogo, McShea está acostumbrado a pensar sobre el tipo de complejidad que observa en los fósiles, como los huesos ensamblados de un esqueleto. Pero en los últimos años algunos biólogos moleculares han comenzado a pensar por su cuenta en términos muy similares a los suyos acerca de cómo surge la complejidad.

En los años noventa del siglo xx, un grupo de biólogos canadienses comenzó a reflexionar en torno al hecho de que las mutaciones a menudo no ejercen efecto alguno sobre el organismo en cuestión. En la jerga de la biología evolutiva se denominan mutaciones neutras. Los científicos, entre ellos Michael Gray, de la Universidad Dalhousie en Halifax, propusieron que las mutaciones podían generar estructuras complejas sin necesidad de pasar por una serie de formas intermedias. Bautizaron este proceso como evolución constructiva neutra.

A Gray le han alentado algunos estudios novedosos que ofrecen pruebas convincentes sobre la evolución constructiva neutra, entre ellos los de Joe Thornton, de la Universidad de Oregón. Su equipo parece haber hallado un ejemplo en los hongos. Las células de estos tienen que trajinar átomos de un lado a otro para permanecer vivas. Una de las formas para hacerlo consiste en bombas moleculares llamadas complejos ATPasa vacuolares. Un anillo giratorio de proteínas traslada átomos de un lado a otro de la membrana del hongo. Este anillo constituye sin lugar a dudas una estructura compleja. Está formado por seis moléculas proteicas: cuatro corresponden a Vma3, una a Vma11 y otra a Vma16. Los tres tipos de proteínas son imprescindibles para que el anillo gire.

Con el fin de saber cómo evolucionó esta estructura compleja, Thornton y sus colaboradores compararon estas moléculas con versiones afines de otros seres vivos, como los animales. (Los hongos y los animales comparten un ancestro común que vivió hace unos mil millones de años.)

Los complejos ATPasa vacuolares de los animales también poseen anillos giratorios formados por seis proteínas. Pero estos muestran una diferencia crucial: en lugar de tres tipos de

proteínas contienen solo dos. Cada anillo está compuesto por cinco copias de Vma13 y una de Vma16; carecen de Vma11. De acuerdo con la definición de complejidad de McShea y Brandon, los hongos son más complejos que los animales, al menos en lo que concierne a los complejos ATPasa.

Los genes que codifican las proteínas del anillo han sido objeto de estudios meticulosos. La Vma11, exclusiva de los hongos, ha resultado ser una pariente cercana de la Vma3, presente tanto en los animales como en los hongos. Por tanto, los genes de ambas proteínas han de compartir un antepasado común. Thornton y sus colaboradores llegaron a la conclusión de que en los inicios de la evolución de los hongos, un gen ancestral de las proteínas anulares se duplicó por accidente y las dos copias evolucionaron hasta convertirse en Vma3 y Vma11.

Mediante la comparación de los genes de la Vma3 y la Vma11, el equipo de Thornton reconstruyó el gen ancestral del que proceden. A continuación crearon la proteína a partir de esa secuencia de ADN; reprodujeron así una molécula de 800 millones de años de antigüedad a la que denominaron Anc.3-11, abreviatura de *anc*estro de Vma*3* y Vma*11*. Se preguntaron cómo funcionaría el anillo con esta proteína antigua. Para averiguarlo, introdujeron el gen de la Anc.3.11 en el ADN de una levadura e inactivaron los genes derivados correspondientes a Vma3 y Vma11. En condiciones normales, la inactivación de tales genes causaría la muerte de la levadura porque esta sería incapaz de construir los anillos. Pero Thornton y sus colaboradores comprobaron que sobrevivía gracias a la Anc.3-11; al combinar esta con la Vma16 lograba construir anillos completamente funcionales.

Experimentos como este han permitido formular una hipótesis para explicar el incremento de complejidad del anillo de los hongos. En un principio estaba constituido por dos proteínas, las mismas de los animales. Estas resultaban versátiles y podían unirse entre sí o con sus compañeras, tanto por el lado derecho como el izquierdo. Después, el gen de la Anc.3-11 se duplicó hasta convertirse en los de Vma3 y Vma11. Las nuevas proteínas siguieron desempeñando la función de sus antecesoras: formar los anillos de las bombas. Pero a lo largo de millones de generaciones, los hongos sufrieron mutaciones. Algunas les arrebataron su versatilidad: la Vma11 perdió la capacidad para unirse a la Vma3 por su lado izquierdo, y la Vma3 no pudo volver a unirse a la Vma16 por ese mismo lado. Estas mutaciones no afectaron a la levadura, ya que las proteínas pudieron seguir uniéndose para formar el anillo. Es decir, eran mutaciones neutras. Pero desde ese momento el anillo se volvió más complejo, porque solo podía montarse correctamente si las tres proteínas concurrían y se organizaban de un modo determinado.

El equipo de Thornton ha descubierto precisamente el tipo de episodio evolutivo que la ley de fuerza cero predice. Con el paso del tiempo, la vida produjo más partes, más proteínas anulares. Y esos componentes adicionales comenzaron a diferenciarse los unos de los otros. Los hongos acabaron poseyendo una estructura más compleja que la de sus ancestros. Pero el proceso no sucedió según la idea pensada por Darwin, en la que la selección natural habría favorecido una serie de formas intermedias. En lugar de ello, el anillo de los hongos degeneró hasta adquirir complejidad.

REPARACIÓN DE ERRORES

Gray ha hallado otro ejemplo de evolución constructiva neutra en la forma en que muchas especies editan sus genes. Cuando las células necesitan fabricar una proteína transcriben el ADN del gen en ARN (la monohebra complementaria del ADN) y, mediante unas enzimas especiales, sustituyen ciertos elementos constructivos del ARN (nucleótidos) por otros. La edición del ARN es esencial para muchas especies, incluida la nuestra (las moléculas de ARN que no son editadas dan lugar a proteínas inoperantes). Pero en todo ello hay algo extraño: ¿por qué desde un principio no disponemos de los genes con la secuencia correcta y obviamos la edición del ARN?

Gray propone una hipótesis para explicar la evolución de la edición del ARN: una enzima muta de tal modo que puede unirse al ARN y cambiar algunos nucleótidos. La enzima no daña la célula, pero tampoco sirve de gran cosa, al menos de momento. Como resulta inocua, perdura. En algún momento posterior un gen sufre una mutación perjudicial. Por suerte, la célula dispone de la enzima que se une al ARN y repara la mutación durante la edición. Así protege a la célula de los daños originados por la mutación, pero permite que esta se transmita a la siguiente generación y se difunda a toda la población. La evolución de esta enzima editora del ARN y de la mutación que repara no ha sido impulsada por la selección natural, sostiene Gray. Ese nivel superior de complejidad surgió por sí solo, de modo «neutral». Por tanto, una vez extendido no hay forma de deshacerse de él.

David Speijer, bioquímico de la Universidad de Ámsterdam, cree que Gray y sus colaboradores han prestado un buen servicio a la biología con su idea de la evolución constructiva neutra, sobre todo porque ponen en tela de juicio la noción de que toda complejidad debe ser adaptativa. Pero Speijer teme que en ciertos casos estén llevando su argumento demasiado lejos. Por un lado, opina que las bombas de los hongos constituyen un buen ejemplo de evolución constructiva neutra. Pero en otras situaciones, como en la edición del ARN, cree que no deberían descartar la posible implicación de la selección natural, por más que la complejidad parezca inútil.

Gray, McShea y Brandon reconocen el gran protagonismo de la selección natural en la aparición de la complejidad que nos rodea, desde la bioquímica que modela una pluma hasta las fábricas fotosintéticas que albergan las hojas de los árboles. Pero esperan que sus investigaciones inciten a otros biólogos a pensar más allá de la selección natural y a vislumbrar la posibilidad de que las mutaciones aleatorias pueden impulsar la evolución de la complejidad por sí solas. En palabras de Gray: «No descartamos la adaptación como parte de todo ello. Solo creemos que no lo explica todo».

Este artículo ha sido redactado en colaboración con Quanta Magazine, *una división independiente de SimonsFoundation.org.*

PARA SABER MÁS

Biology's first law: The tendency for diversity and complexity to increase in evolutionary systems. Daniel W. McShea y Robert N. Brandon. University of Chicago Press, 2010.

How a neutral evolutionary ratchet can build cellular complexity. Julius Lukeš et al. en *IUBMB Life*, vol. 63, n.º 7, págs. 528-537, julio de 2011.

Este artículo y otras informaciones sobre *Quanta Magazine* están disponibles en **www.simonsfoundation.org/quanta/20130716-the-surprising-origins-of-lifes-complexity/**

EN NUESTRO ARCHIVO

La evolución del ojo. Trevor D. Lamb en *IyC*, septiembre de 2011.

Peces cavernícolas. A. Romero en *IyC*, septiembre de 2011.

Paul Kunitzsch fue hasta 1995 profesor de estudios árabes en el Instituto de Estudios Semíticos de la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich. Tras su jubilación ha continuado investigando la astronomía árabe e islámica, así como sus repercusiones en la ciencia europea.



HISTORIA DE LA CIENCIA

El árabe en la astronomía

Más de doscientos nombres de estrellas, varios cráteres lunares y tres términos astronómicos empleados aún hoy dan testimonio de los mil años de relación entre Occidente y la ciencia en el mundo musulmán

Paul Kunitzsch

Hoy en día no solemos asociar la cultura árabe o islámica con la ciencia de vanguardia. Hace alrededor de mil años, sin embargo, la situación era muy distinta. Las investigaciones que los eruditos musulmanes llevaron a cabo durante varios siglos contribuyeron de manera decisiva a la reactivación y expansión de la ciencia en Europa. Entre otras disciplinas, la tradición árabe desempeñó un importante papel en el desarrollo de la astronomía. ¿A qué estudiosos musulmanes debemos esa influencia? ¿Cuándo se produjo el encuentro entre Oriente y Occidente? ¿Cómo acabó el mundo occidental haciendo suyo el conocimiento árabe?

EN SÍNTESIS

Durante la Edad Media, los sabios musulmanes continuaron los estudios astronómicos de la Antigüedad. Sus obras fueron traducidas del árabe al latín por monjes cristianos, gracias a lo cual la ciencia árabe penetró en Europa.

Numerosos términos astronómicos de origen árabe forman hoy parte de nuestro acervo cultural. Su camino a través del laberinto lingüístico de la tradición solo puede reconstruirse a través del estudio cuidadoso de las fuentes originales.

El significado inicial de múltiples nombres de estrellas de origen árabe fue adulterado debido a errores básicos de transcripción, falta de conocimientos por parte de los copistas e interpretaciones aventuradas e inexactas.



CORTESÍA DE PAUL KUNITZSCH/TULLIO TOMBA, MILÁN

ASTROLABIO DEL SIGLO XIV con inscripciones latinas. En la «araña», la malla rotatoria situada sobre el disco fijo que contiene las coordenadas del horizonte, las estrellas están indicadas mediante trazos puntiagudos y acompañadas de las transcripciones latinas de sus nombres árabes. El detalle superior muestra las correspondientes a Vega (*derecha*) y Altair (*centro*), transcrita como 'Altayr'.

SOBRE ESTA EDICIÓN

Las transcripciones de las voces árabes originales se indican en cursiva (*samt*); los intentos históricos por adaptar su grafía al alfabeto latino se escriben entre comillas simples (‘zamt’, ‘zenit’).

Se ha intentado que, en la medida de lo posible, las transcripciones de los vocablos y nombres árabes reproduzcan con una fidelidad razonable la pronunciación original si se leen de acuerdo con las reglas habituales del castellano, con las siguientes salvedades: el símbolo ’ corresponde a la consonante gutural *’ayn* (sin equivalente en español, si bien puede aproximarse al sonido producido al articular con brevedad una interjección como «¡oh!»); la *h* indica una pronunciación aspirada; el dígrafo *sh* representa un sonido similar al que a veces toman la *ll* o la *y* en el español rioplatense («pollo, yate»); la *z* denota una *s* sonora, sonido que no existe en castellano, pero sí, por ejemplo, en catalán («*casa*»).

Con anterioridad a la llegada del islam, los habitantes de la península arábiga eran en su mayoría beduinos que vivían en el desierto y que, en gran medida, habían permanecido al margen de la evolución que habían experimentado las culturas vecinas, como la sumeria, la babilonia o la griega. Su existencia, muy condicionada por la necesidad de hacer frente a las inhóspitas condiciones del entorno, les llevó a desarrollar un saber propio basado en la observación y en la experiencia.

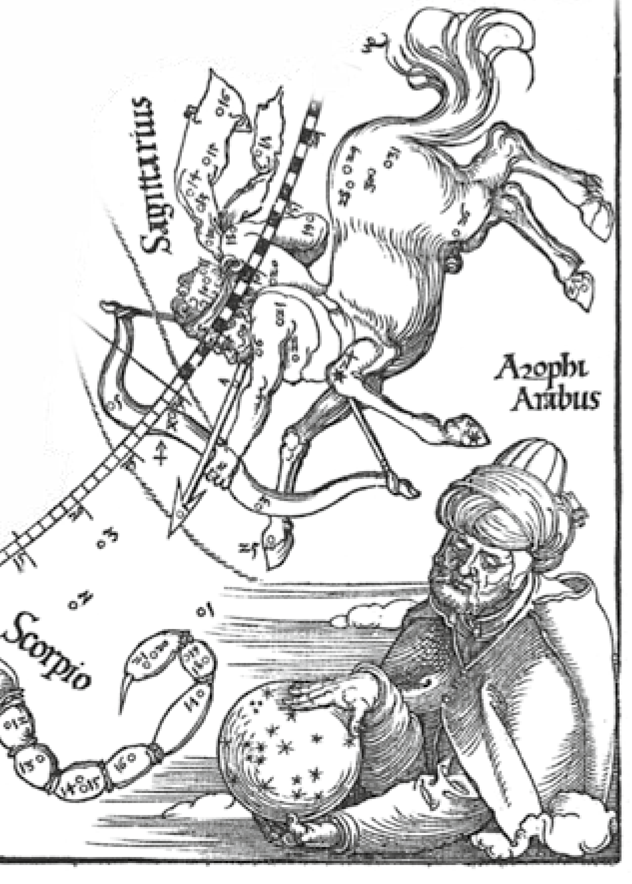
El conocimiento del cielo nocturno y sus cambios formaba parte de aquel saber. El movimiento periódico de los astros les sirvió para determinar las estaciones, tanto las temporadas seca y de lluvias como los períodos de frío y calor. Más de trescientos astros recibieron un nombre a partir de esa manera de concebir el calendario. Entre ellos no solo se encontraban las estrellas más brillantes del cielo, sino también otras más tenues, fáciles de pasar por alto en latitudes más altas.

La imagen del cielo que manejaban los antiguos árabes difería de la que tenían griegos y babilonios, a partir de la cual surgirían las constelaciones modernas. Por regla general, los árabes no agruparon las estrellas en figuras, sino que se ocuparon más bien de dar nombre a cada una de ellas por separado. Para ello emplearon, al igual que otras culturas, términos de la vida cotidiana, con lo que determinados astros pasaron a convertirse en pastores, pájaros o lobos.

A comienzos del siglo VII, los pueblos de la península arábiga se expandieron. El profeta Mahoma, que vivió entre los años 570 y 632 de nuestra era, proclamó la religión islámica, a la que en pocas décadas se convirtieron la mayoría de las tribus árabes. Tras la muerte del profeta, las conquistas militares expandieron el islam hacia Oriente Próximo, Oriente Medio y el norte de África, que hasta ese momento habían permanecido bajo influencia persa y bizantina.

Fue el contacto con las culturas de esas regiones lo que daría comienzo a lo que hoy denominamos ciencia árabe. Los musulmanes se introdujeron en la ciencia a través de la traducción de numerosas obras persas, griegas y algunas indias, y pronto comenzaron a realizar sus propias investigaciones. Más adelante, los artífices de esta ciencia «árabe» no serían únicamente los procedentes de la península arábiga, sino miembros de todos los grupos étnicos del mundo islámico. Con todo, durante varios siglos escribieron sus obras exclusivamente en árabe, razón por la que, aún hoy, en Occidente hablamos de «ciencia árabe».

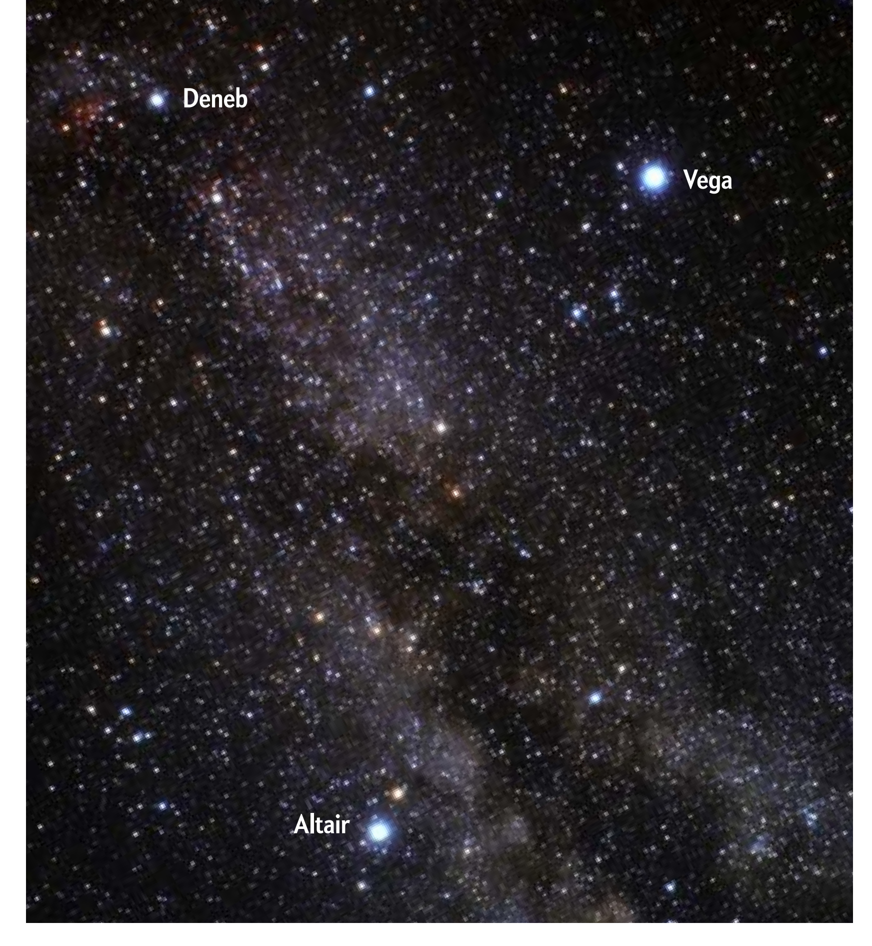
En el año 711, los conquistadores musulmanes cruzaron el estrecho de Gibraltar y llegaron a la península ibérica, donde en pocos años controlaron casi todo el territorio. Después, los reinos cristianos responderían con un avance gradual de norte a sur hasta que, en 1492, los últimos reyes musulmanes fueron expulsados de Granada. Así pues, durante más de siete siglos, la península ibérica fue el principal punto de encuentro entre los europeos y la astronomía árabe. Lo que se investigaba y escribía en la región oriental de los territorios musulmanes, en Bagdad y El Cairo, llegó también a al-Ándalus. Los europeos adoptaron buena parte de esos conocimientos, así como las propias creaciones de los musulmanes de al-Ándalus. Desde finales del siglo X hasta el XIII, en las partes cristianas del país se tradujeron



ALBERTO DURERO, EL HEMISFERIO NORTE CELESTE; *IMAGINES COELI SEPTENTRIONALES CUM DUODECIM IMAGINIBUS ZODIACI* (1515)/*STERNE UND WELTRAUM*

AS-SUFI INFLUYÓ en la astronomía musulmana a través de la nomenclatura de las estrellas y la representación pictórica de las constelaciones. Aunque su *Libro de las estrellas fijas* no fue traducido al latín durante la Edad Media, sus ilustraciones sí se conocían en Occidente, donde fueron reproducidas en repetidas ocasiones. Alberto Durero lo retrató en un mapa celeste de 1515 en una figura que rotuló como «Azophi Arabus».

numerosos textos astronómicos y astrológicos del árabe al latín. Ello supuso el origen de la contribución árabe a la astronomía occidental, la cual perdura hasta hoy.



DENEB, VEGA Y ALTAIR: Los nombres de las tres brillantes estrellas del conocido Triángulo de Verano son de origen árabe. Deneb, en la cola de la constelación del Cisne según el *Almagesto* de Ptolomeo, debe su nombre a la voz árabe *danab* («cola»). El de Vega proviene del nombre tradicional árabe *an-Nasr al-Waqui*, «el águila en picado», mientras que Altair deriva de *an-Nasr at-Tair*, «el águila en vuelo».

LAS DIRECCIONES DEL CIELO

Entre los términos astronómicos usados en la actualidad encontramos varias voces procedentes del árabe. Una de ellas es cenit, la palabra que designa el punto del cielo situado justo encima del observador. En árabe recibía el nombre *samt ar-ras*, «dirección de la cabeza». En las traducciones al latín del siglo XII, el vocablo se transcribió de múltiples formas; entre ellas, 'zemt', término que, debido a la ambigüedad que en la escritura medieval presentaban las letras *m*, *n* e *i* (entre otras), y debido a la ignorancia de la palabra árabe subyacente, acabaría convirtiéndose en 'zenit'.

El nadir, el punto de la esfera celeste opuesto al cenit, recibe en árabe el nombre *nacir*, «opuesto, correspondiente». Ya en el siglo X, la palabra figura transcrita como 'nadir' en algunas obras sobre el uso del astrolabio, el instrumento de mano tan popular en la Edad Media (primero en Oriente, y luego también en Europa) que permitía establecer la posición de ciertas estrellas de referencia, determinar la hora durante el día o la noche, y efectuar mediciones geodésicas.

A fin de dividir el horizonte en unidades angulares de medida, los árabes utilizaron círculos máximos que recorrían la esfera celeste entre el cenit y el nadir e intersecaban el horizonte en ángulo recto. Esos círculos se denominaron *as-sumut*, plural de *samt* («dirección», la misma palabra mencionada más arriba). La unidad correspondiente fue designada en árabe mediante el singular, *samt*; sin embargo, debido a una redacción confusa en los documentos latinos del siglo XII, se generalizó el uso de la forma plural *as-sumut* para el singular, motivo por el que aún hoy hablamos de «el» azimut.

Con todo, el mayor legado de términos árabes en nuestro cielo nocturno lo hallamos en el nombre de más de doscientas estrellas, así como en las numerosas variantes ortográficas aparecidas durante los últimos mil años. En la creación de esta plétora de nombres participaron, principalmente, tres grupos de autores. Por un lado, los eruditos medievales que tradujeron las obras árabes al latín entre finales del siglo X y el siglo XIII, junto con los astrónomos occidentales que les siguieron y que continuaron usando esos nombres en sus propios trabajos. Por otro, los estudiosos de todo tipo que, desde el siglo XVI, trataron de explicar con mayor o menor fortuna el significado de los nombres árabes —a menudo corruptos— para devolverlos a su forma original. Por último, los astrónomos que, desde el siglo XVI hasta el XX, se basaron en estudios lingüísticos para continuar seleccionando nombres (de nuevo, más o menos apropiados) con el objetivo de añadirlos al corpus astronómico.

Algunos nombres de estrellas provienen del árabe antiguo. Otros fueron acuñados por los eruditos musulmanes a partir de la terminología griega, que conocían principalmente a través del *Almagesto*, el tratado que Claudio Ptolomeo escribiría hacia el año 150 de nuestra era y que, entre los siglos VIII y IX, fue traducido al árabe en tres ocasiones. Debido a una antigua tradición, los árabes tradujeron el título de la obra a partir del superlativo griego *Megiste syntaxis* («el más grande de los tratados», como también se la conocía). A partir de este formaron el híbrido *al-Mayisti*, que posteriormente devino en *Almagesto* en Occidente.

Los traductores al latín transcribieron los nombres árabes con toda la corrección que el alfabeto latino y las pronunciaciones regionales de la España de la época permitían. Por aquel entonces las obras debían reproducirse a mano, y los copistas, que ya experimentaban problemas con su amado latín, a menudo no sabían muy bien qué hacer con aquellas palabras tan extrañas. Eso provocó que, con el tiempo, surgieran las variantes ortográficas más insólitas. Así, la estrella Alfa Canis Majoris, que en árabe recibía el nombre de *al-Abur*, «la que cruzó (la Vía Láctea)», se convirtió primero en 'Alabor' y 'Alhabor', las cuales evolucionarían hacia 'Alahabor', 'Alhahabor' y 'Halahabor', entre otras. Al final, los eruditos del Renacimiento acabarían por imponer su nombre clásico de origen griego, Sirio.

La invención de la imprenta introduciría cierta estabilidad en la nomenclatura. Pero, al mismo tiempo, aumentó también la dispersión de los nombres árabes de estrellas, debido en parte a los estudiosos que intentaron interpretar sus nombres. Dado que su conocimiento del árabe era limitado y que, por lo general, disponían de muy pocos textos árabes originales, en algunos casos comenzaron a circular variantes ortográficas que nunca existieron en árabe. A continuación examinaremos la tortuosa historia que experimentaron algunos de estos nombres.

TRADICIÓN ERRÁTICA

Hacia finales del siglo x, los monjes cristianos de las inmediaciones de Barcelona trabaron conocimiento con la astronomía árabe. Parece que el astrolabio había llamado particularmente su atención, por cuanto se escribieron varias obras en latín sobre la forma, construcción y uso de este instrumento. A partir de ellas recibirían su nombre 27 estrellas, las cuales fueron incorporadas al astrolabio como luceros de referencia. Cinco de esos nombres continúan empleándose aún hoy: Altair (Alfa Aquilae), Deneb (Alfa Cygni), Aldebarán (Alfa Tauri), Rigel (Beta Orionis) y Algol (Beta Persei). Las denominaciones Deneb y Rigel proceden de la astronomía científica árabe; las tres restantes se retrotraen al árabe antiguo.

Sin embargo, otros nombres de origen árabe no han salido tan indemnes del proceso de transmisión. Un buen ejemplo lo hallamos Betelgeuse, la estrella más brillante de la constelación de Orión (Alfa Orionis). En árabe antiguo el astro contaba con dos nombres: uno de ellos, *Mankib al-Yauza*, «el hombro de Yauza» (un personaje femenino de la cultura árabe antigua), desapareció durante la Edad Media; el otro era *Iad al-Yauza*, «la mano de Yauza». En una tabla de estrellas confeccionada en 1246, Juan de Londres transcribió *Iad al-Yauza* como 'Bedalgeuze', debido probablemente a un pequeño desliz. En árabe, la letra inicial de la palabra *iad* consta de cierto trazo con dos puntos debajo. Sin embargo, Juan de Londres debío apreciar solo un punto en el documento que usó como fuente, lo que convertía el carácter en el equivalente a la letra latina *b*. De esta manera, *iad* habría mutado en *bed*, una palabra inexistente en árabe.

Los nombres árabes de estrellas fueron a menudo construidos e interpretados de manera incorrecta incluso hasta bien entrado el siglo XX

En el siglo xvi, Joseph Justus Scaliger interpretaría el nuevo nombre a partir de un inexistente *Bat al-Yauza*, «la axila de Yauza», que transcribió como 'Betelgeuze', muy próxima a la variante ortográfica actual. También Johann Bayer incluyó este término en su atlas celeste *Uranometria*, publicado en 1603. Cuando en 1720 apareció una edición en lengua alemana, la *l* se imprimió erróneamente como una *i*. Como consecuencia de esa errata, el nombre alemán del astro es hoy Beteigeuze.

Los aventurados intentos interpretativos realizados tanto por parte de los estudiosos europeos como de los eruditos árabes son innumerables. En todo caso, la mayoría de los nombres han sufrido tantas alteraciones que, en la actualidad, los árabes ya no son capaces de reconocer su origen. Para esclarecer su verdadera identidad resulta imprescindible seguirles la pista en detalle, de una fuente a otra, a través de todas sus etapas de transmisión. En lo que respecta a Betelgeuse, aparte de inspirar el bautizo de algún carguero militar, su nombre experimentó una divertida revitalización gracias a la comedia de Tim Burton *Beetlejuice*, de 1988. La pronunciación inglesa de esta variante ortográfica (cuyo significado es «zumo de escarabajo») se corresponde de manera bastante aproximada con la del nombre de la estrella más brillante de Orión.

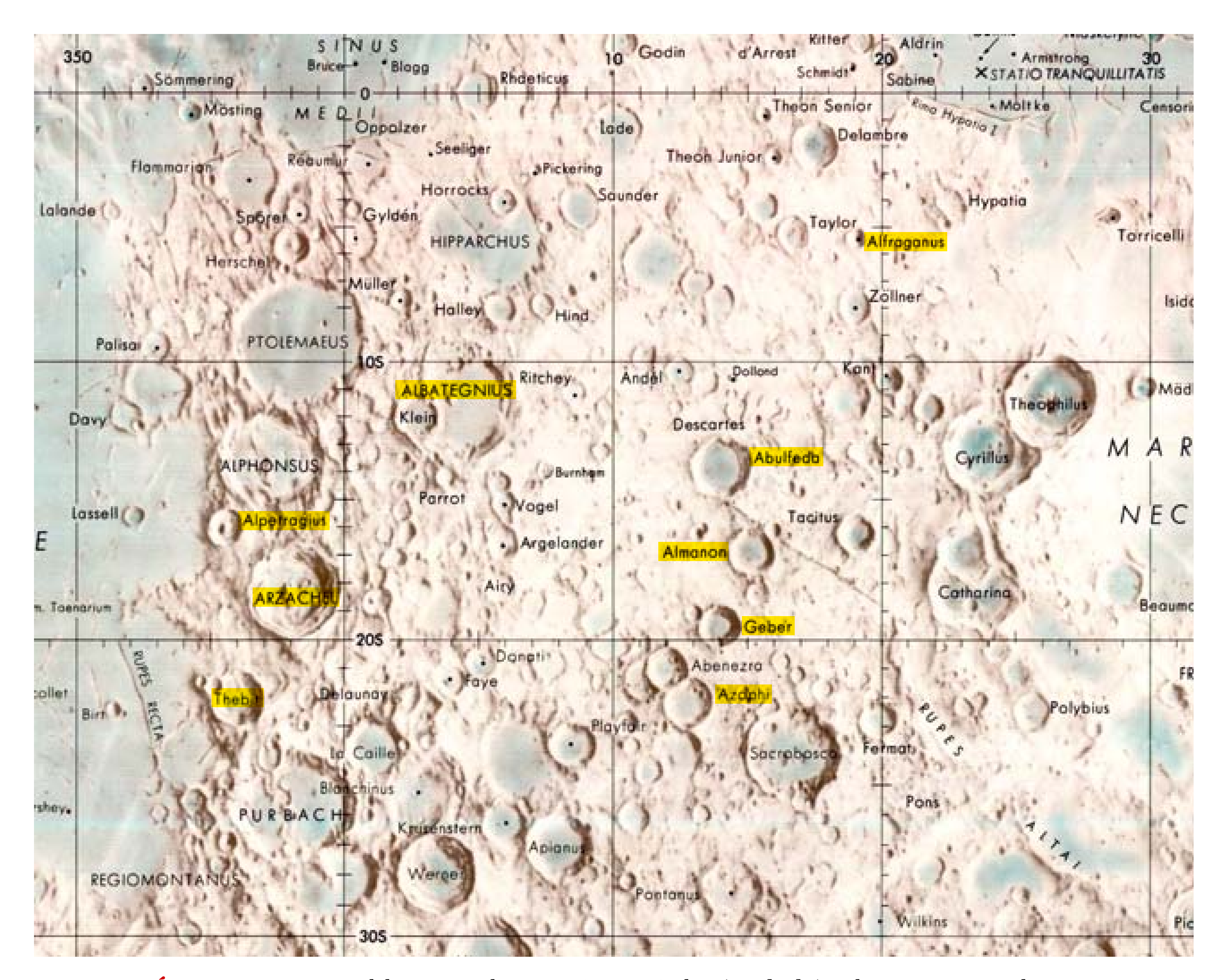
Las estrellas Beta y Gamma Aquilae, de la constelación del Águila, reciben hoy los respectivos nombres Alshain y Tarazed. Su historia también se muestra extremadamente enrevesada. En la astronomía popular de los antiguos árabes, las estrellas Alfa, Beta y Gamma Aquilae, que casi conforman una línea recta, eran llamadas *al-Misan*, «la balanza». Nasir ad-Din at-Tusi, astrónomo persa del siglo xiii, adoptó esa denominación y la tradujo a su lengua como *Shahin-i Tarazu*, «el brazo de la balanza». Cuando, en 1665, el orientalista de Oxford Thomas Hyde publicó el catálogo de estrellas de Ulugh Beg (astrónomo y gobernante de Samarcanda en el siglo xv) en una edición que incluía la versión en persa, su traducción al latín y un extenso comentario, citó el nombre persa de la obra de at-Tusi. Y, ya fuese porque la referencia que utilizó Hyde estuviera mal escrita o porque él se equivocase al leerla, transcribió el nombre persa como 'Shahin Tarazed', que tradujo al latín como *falco praedans*, «el halcón predador».

Con ello, Hyde puso sobre una pista falsa a todos los intérpretes posteriores. Es cierto que la palabra persa *shahin* puede significar también «halcón», además de «brazo de balanza». Quizá Hyde se guiase por el hecho de que el nombre en árabe antiguo para la estrella Alfa Aquilae, o para el conjunto de Alfa, Beta y Gamma Aquilae, era *an-Nasr at-Tair*, «el águila en vuelo» (de ahí procede, de hecho, el nombre actual de Altair para Alfa Aquilae). La palabra *tarazed*, sin embargo, no existe en persa; solo refleja una lectura equivocada de *tarazu*, «balanza».

En el siglo xix, el astrónomo siciliano Giuseppe Piazzi incorporó casi un centenar de nombres árabes del libro de Hyde a su catálogo astronómico de 1814. Al hacerlo, introdujo los nombres 'Alshain' (extendido de manera artificial con el artículo árabe *al*-) para Beta Aquilae y 'Tarazed' para el astro vecino. Más tarde, numerosos intérpretes concebirían portentosas interpretaciones para estos dos nombres, árabes solo en apariencia.

Otro ejemplo de estrella con un nombre de apariencia árabe que nunca fue empleado en dicha cultura lo encontramos en Lesath. La historia comienza con Ptolomeo, que en su *Almagesto* describió cinco astros como «nebulosas». En su última obra, *Tetrabiblos*, vuelve a incidir en ellas. Entre estas se encontraba cierto objeto de la cola de Escorpio que hoy conocemos como cúmulo abierto Messier 7, o cúmulo de Ptolomeo. En una traducción al árabe del *Tetrabiblos*, el término para dichos objetos nebulosos era *al-latja*, «la mancha (borrosa)».

Cuando, en 1138, Platón de Tívoli tradujo en Barcelona el *Tetrabiblos* del árabe al latín, transcribió el término como 'alatha'. Siglos después, con ayuda de dicho libro, Luca Gaurico compiló en Venecia una lista con las propiedades astrológicas de las estrellas y la añadió a su edición de 1524 de las *Tablas alfonsíes*. En ella, 'alatha' se convierte en 'alascha'. Ello no habría tenido mayor importancia si Scaliger, en su obra de 1600, no hubiese tratado de explicar también este vocablo. El autor conjeturó que 'alascha' podía provenir del término árabe *las'a*, «aguijón (de un escorpión)», que transcribió como 'lesath'. Johann Bayer, en su *Uranometria*, asignó ese nombre a Upsilon Scorpii, en la cola de la constelación de Escorpio. Piazzi, en su catálogo de 1814, lo utilizó para la estrella contigua —y más brillante— Lambda Scorpii.



VARIOS CRÁTERES LUNARES deben su nombre a astrónomos árabes (*resaltados*), si bien en ocasiones las transcripciones medievales dificultan trazar su origen.

NASA

ARABIZACIONES MODERNAS

Los ejemplos anteriores muestran cuán compleja y enmarañada ha sido la evolución de algunas voces árabes en la tradición astronómica. Cada uno de los más de doscientos nombres de estrellas con origen en ese idioma podría contar su propia historia. Algunos de los que usamos hoy no se emplearon en un principio para designar astros, pero acabaron haciéndolo porque sus intérpretes no conocían o no tuvieron en cuenta el trasfondo lingüístico o factual.

Lo mismo ocurrió hasta bien entrado el siglo xx. De este período más reciente mencionaremos tres ejemplos: Suhail (Lambda Velorum), Al Nair (Alfa Gruis) y Muhlifain (Gamma Centauri). Estos nombres fueron introducidos por astrónomos o autores de manuales náuticos de los Estados Unidos, que los escribieron con las grafías que aparecían en el libro *Star-names and their meanings* («Los nombres de las estrellas y su significado»), publicado en Nueva York en 1899 por Richard H. Allen. La información sobre nombres árabes incluida en esta obra se basa a menudo en interpretaciones previas incorrectas, y muestra además numerosos errores lingüísticos. No obstante, el libro, que fue reeditado sin modificaciones en 1963 bajo el título *Star names, their lore and meaning* («Nombres de estrellas, su tradición y significado»), goza de gran popularidad en el mundo de habla inglesa.

Suhail se originó a partir del nombre que en árabe antiguo recibió Canopo (Alfa Carinae); sin embargo, los autores estadounidenses asociaron este nombre a la estrella Lambda Velorum. Al Nair, por su parte, es atribuible a una transcripción errónea de Allen, quien en realidad se refería al término árabe *an-nair*, «la brillante». En última instancia, el origen de esta denominación se encuentra en una ilustración árabe de 1534, en la que la estrella es identificada como «la (estrella) brillante de la cola del pez (del sur)», tal como consta en el libro de Thomas Hyde de 1665. Por último, Muhlifain no designaba estrella alguna. En la tradición árabe aparecían los nombres de dos astros cuya identificación planteaba dudas, por lo que recibieron el apelativo de *muhlifan*, «las que toman juramento», pues algunos jurarían que eran dos estrellas determinadas, y otros, que se trataba de dos astros diferentes. A partir del nominativo *muhlifan*, acabó introduciéndose el acusativo-genitivo *muhlifain* y, después, el término acabaría interpretado como el nombre de una estrella. Para complicar aún más las cosas, Piazzi ya había asignado la misma palabra, transcrita como 'Muliphein', a la estrella Gamma Canis Majoris en 1814.

Tales rompecabezas quedan también patentes en el *Atlas coeli*, publicado en Praga en 1951. En él, el astrónomo checo Antonin Bečvář empleó catorce nombres de apariencia árabe

desconocidos hasta el momento. A dos de ellos sí puede seguírseles la pista: Haris (Gamma Bootis) probablemente proviniese de *haris as-sama*, «el guardián del cielo», una interpretación árabe del griego *Arctophylax* («el guardián de la osa»), por el que también se conocía la constelación de Bootes (Boyero). Otro nombre, Segin, tal vez constituyese una variante ortográfica de 'Ceginus', que, después de una sucesión de alteraciones a través de las numerosas transcripciones latinas y árabes, puede también retrotraerse al nombre griego de Bootes. Los otros doce nombres, como Achird (Eta Cassiopeiae), Hassaleh (Iota Aurigae) y Hatysa (Iota Orionis), siguen siendo un misterio, pues no parecen derivar del árabe, del latín ni del griego. ¿Tal vez fueran una invención de Bečvář?

DE LAS ESTRELLAS A LA LUNA

Traducidas al latín, las obras de los astrónomos y astrólogos árabes continuaron siendo leídas y citadas en Europa hasta bien entrado el siglo XVII. Después, con el advenimiento de la astronomía copernicana, perdieron su vigencia y quedaron reducidas a documentos para la investigación histórica. Pero la fama de la astronomía árabe no se extinguió entre los astrónomos europeos. Aparte de los constantes intentos de introducir nombres árabes para las estrellas, otras áreas de la astronomía continuaron rindiendo tributo a la herencia semita.

Cuatro fabricantes europeos de esferas celestes consideraron incluir en sus modelos los nombres de las constelaciones no solo en la forma árabe latinizada de la Edad Media, sino también en su grafía original (la cual, desde luego, casi ningún occidental podía leer). El holandés Willem Janszoon Blaeu adoptó los nombres árabes —a menudo de origen falaz— del libro publicado en 1600 por Joseph Scaliger y Hugo Grotius. En el siglo XVII, el también holandés Jacob Colom empleó los nombres árabes auténticos del *Libro de las estrellas fijas*, del astrónomo persa Abd ar-Rahman as-Sufi. Vincenzo Coronelli, veneciano, construyó una esfera gigante de casi cuatro metros de diámetro en la que también usó los nombres auténticos de as-Sufi. Para otra serie de globos de 110 centímetros de diámetro, solicitó que varios ayudantes desconocidos tradujeran de nuevo los nombres árabes, probablemente a partir del francés. Por último, ya en el siglo XVIII, el fabricante londinense de instrumentos George Adams incluyó en uno de sus modelos las «28 mansiones de la luna» árabes junto con sus nombres, también en alfabeto árabe, que tomó del libro de Thomas Hyde. Su hijo, Dudley Adams, confeccionaría una segunda tirada de aquel globo en 1789.

Hoy, un total de 24 cráteres lunares llevan el nombre de importantes astrónomos musulmanes. El punto de partida de este proceso de nomenclatura se remonta al siglo XVII, cuando el matemático y astrónomo italiano Giambattista Riccioli incluyó en su gran obra *Almagestum novum* un mapa de la Luna que había diseñado su discípulo Francesco Maria Grimaldi.

En él, Grimaldi usó para los principales cráteres los nombres de conocidos astrónomos y matemáticos del pasado. Más de 200 de ellos han sido incluidos en la nomenclatura oficial usada hoy en día para denotar los accidentes de nuestro satélite natural. Entre ellos se encuentran los de diez astrónomos árabes que adquirieron fama en Europa a través de las traducciones medievales al latín, todos ellos con su nombre en la forma latina medieval. As-Sufi, por ejemplo, aparece como Azophi. Detrás del Almaeon propuesto por Grimaldi (hoy escrito Almanon) no se esconde, sin embargo, ningún astrónomo, sino el califa al-Mamun, soberano en Bagdad desde el año 813 hasta el 833. El monarca fue un gran mecenas de las ciencias; encargó una gran cantidad de traducciones del griego al árabe, incluida la del *Almagesto* de Ptolomeo, y ordenó nuevas observaciones que sirvieron para mejorar de manera considerable varios de los parámetros clásicos de la obra griega. Así, fue capaz de mejorar el valor para la variación de las posiciones celestes debida a la precesión del eje de rotación de la Tierra, que Ptolomeo había cifrado en un grado cada cien años, hasta fijarlo en un grado cada 66 años (el valor con el que se trabaja hoy es de un grado cada 71 años).

La lista de homenajeados aumentó en 1837 con la publicación del *Mappa selenographica*, de Wilhelm Beer y Johann Heinrich Mädler, quienes incluyeron tres nombres más; entre ellos, Nasireddin (en honor a Nasir ad-Din at-Tusi) y Ulugh Beigh (forma usada por Thomas Hyde para Ulugh Beg). Ya a finales del siglo XX, en plena era espacial, se añadieron otros 11 nombres árabes a los cráteres lunares, en esta ocasión en la cara oculta del satélite. Los astrónomos elegidos en este caso no se encuentran ya —con excepción de al-Juarizmi— entre los que se dieron a conocer gracias a las traducciones latinas de la Edad Media. Sus nombres aparecen escritos con grafías completamente modernas y, tal y como sucede hoy con todos los nombres celestes, fueron seleccionados y establecidos oficialmente por la Unión Astronómica Internacional.

Durante siglos, la reputación de la astronomía árabe en Europa se basó en las aportaciones de las traducciones medievales al latín. Por lo demás, todos los logros astronómicos del mundo musulmán (tanto en la Edad Media como en épocas posteriores) permanecieron ignorados. Solo a partir del siglo XIX comenzaría una investigación más exhaustiva. Sin embargo, dada la ingente cantidad de manuscritos relevantes que albergan las bibliotecas de todo el mundo, aún nos encontramos lejos de forjar una imagen global y definitiva de la astronomía en el mundo islámico.

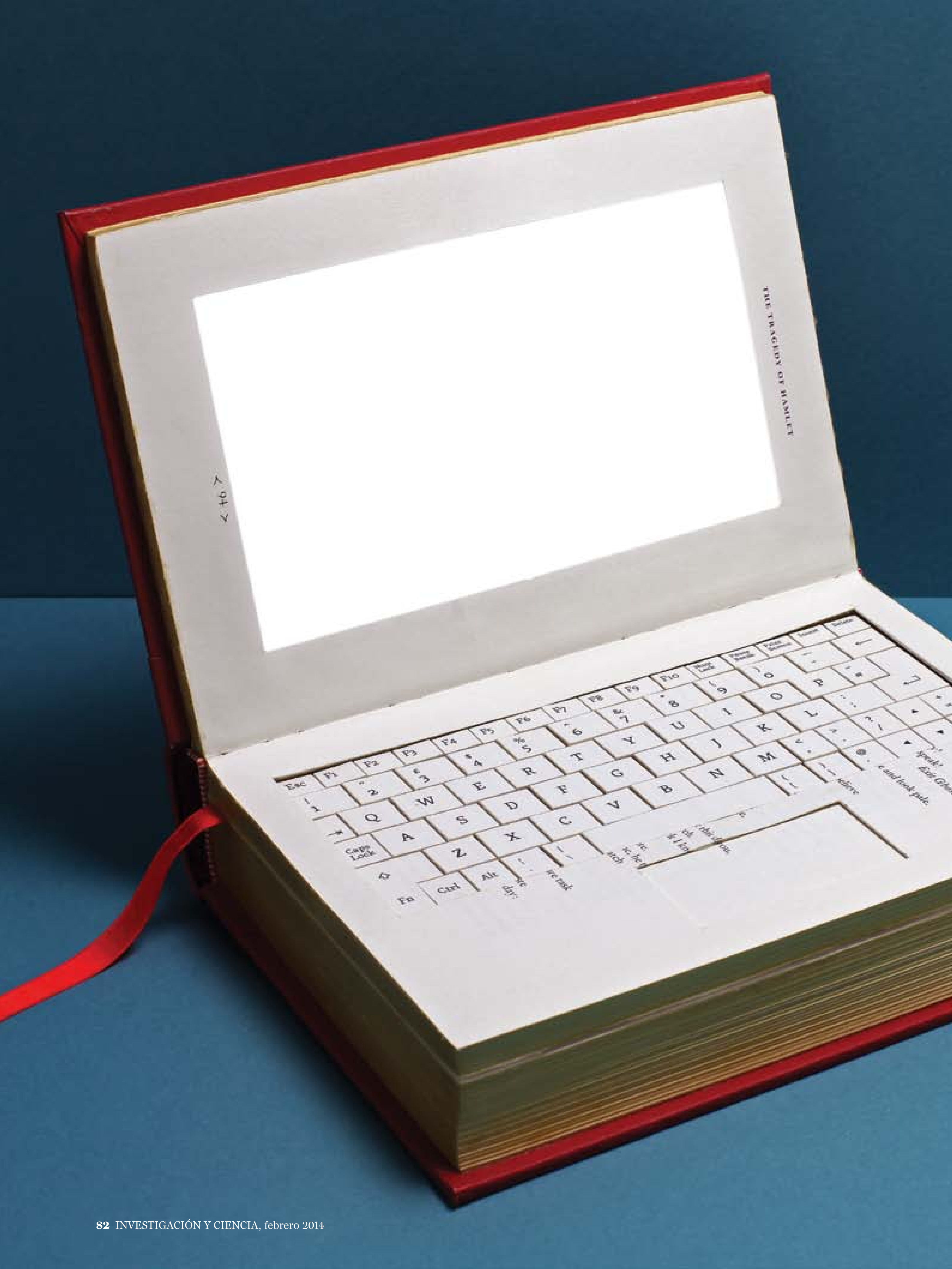
A partir del siglo XX, los pueblos de tradición musulmana han ido adquiriendo una mayor conciencia sobre la importancia de los logros científicos de sus antepasados. Su asimilación al patrimonio cultural ha contribuido a fortalecer la percepción que las naciones musulmanas tienen de su propia valía. Hoy los países árabes vuelven a hacer astronomía moderna. Aparte de las asociaciones de ámbito nacional, en 1998 se fundó la Unión Árabe para la Astronomía y las Ciencias Espaciales (AUASS, por sus siglas en inglés). Con sede en Amán, en Jordania, la asociación agrupa a astrónomos de diversos países árabes y promueve en ellos el avance de esta ciencia milenaria.

PARA SABER MÁS

Names of thirteen Muslim astronomers given to some natural features of the moon. M. A. R. Khan en *Islamic Culture*, vol. 27, págs. 78-85, 1953.
Arabische Sternnamen in Europa. P. Kunitzsch. Harrassowitz, Wiesbaden, 1959.
Die Aussprache der arabischen Sternnamen und der arabischpersischen Namen von Mondobjekten. P. Kunitzsch en *Die Sterne*, vol. 56, págs. 358-363, 1980.
Die sterne des Abd ar-Rahman as-Sufi. G. Strohmaier. Kiepenheuer, Leipzig y Weimar, 1984.
A dictionary of modern star names: A short guide to 254 star names and their derivations. P. Kunitzsch y T. Smart, Sky Publishing Corporation, 2006.

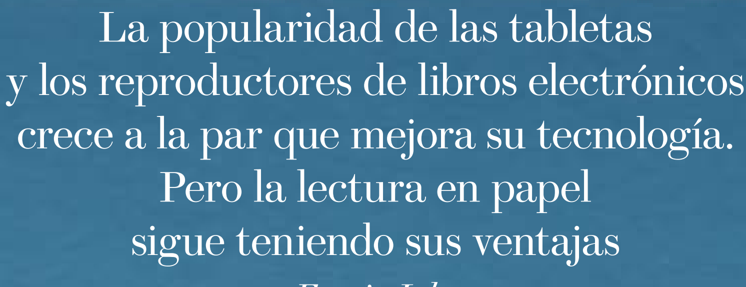
EN NUESTRO ARCHIVO

Astronomía islámica. O. Gingerich, en *IyC*, abril de 1986.
La astronomía griega y la tradición árabe medieval. George Saliba en *IyC*, junio de 2003.
Ulugh Beg. Bernhard du Mont en *IyC*, febrero de 2004.
Las tablas de Ulugh Beg. Heiner Schwan en *IyC*, febrero de 2004.



COGNICIÓN

Por qué el cerebro prefiere el papel



La popularidad de las tabletas y los reproductores de libros electrónicos crece a la par que mejora su tecnología. Pero la lectura en papel sigue teniendo sus ventajas



Ferris Jabr



EN SÍNTESIS

Durante los últimos veinte años, varios estudios han indicado que los textos impresos se comprenden y recuerdan mejor que los presentados en una pantalla. Los formatos digitales impiden que el lector explore el texto de manera intuitiva y se forme una imagen mental de su estructura.

En general, las pantallas fatigan cognitiva y físicamente más que el papel. Moverse por la pantalla reclama una atención constante por parte del usuario; además, la luz directa que proyectan los ordenadores y las tabletas puede cansar la vista y provocar dolor de cabeza.

Varias investigaciones preliminares sugieren que, debido a la distracción que provocan muchos dispositivos electrónicos, incluso los «nativos digitales» recuerdan mejor una historia cuando la leen en papel. La mayor ventaja de este soporte tal vez resida en su simplicidad.

Uno de los vídeos de YouTube más provocadores y más difundidos de los últimos dos años comienza con una escena bastante prosaica: una niña de un año juega con un iPad, pasa sus dedos por la pantalla táctil y arrastra los iconos. Después, sin embargo, la vemos pellizcar, acariciar y golpear las páginas de revistas de papel, como si también estas fueran pantallas.

Para el padre de la niña, el vídeo (titulado *A magazine is an iPad that does not work*, «Una revista es un iPad que no funciona») da testimonio de una transición generacional. En la descripción adjunta al vídeo, escribió: «Las revistas son hoy inútiles e imposibles de entender para los nativos digitales», es decir, para aquellos que han comenzado a usar la tecnología digital desde su más tierna infancia, rodeados no solo por libros y revistas de papel, sino también por teléfonos inteligentes, Kindles y iPads.

Tanto si la niña esperaba que las revistas se comportasen como un iPad como si no, el vídeo lleva a plantearse una cuestión de calado que no solo afecta a los más jóvenes: ¿depende nuestra manera de leer del soporte que utilicemos?

Desde los años ochenta, más de cien estudios de psicología, ingeniería informática, ciencias de la información y biblioteconomía han indagado las diferencias entre leer en papel y en pantalla. Hasta 1992, la mayoría de los experimentos concluían que, sobre una pantalla, las crónicas y los artículos se leían más despacio y se recordaban peor. No obstante, conforme la resolución de las pantallas ha ido mejorando, han comenzado a aparecer resultados más variopintos. Algunas encuestas recientes hacen pensar que, aunque la mayoría sigue prefiriendo el papel (sobre todo si la lectura exige una concentración prolongada), la actitud hacia la pantalla estaría cambiando poco a poco, a medida que la tecnología se perfecciona y el hábito de leer en dispositivos electrónicos se populariza, ya sea para consultar información o con fines lúdicos. En EE.UU., el formato electrónico supone más del 20 por ciento de las ventas totales de libros entre el público general.

Sin embargo, a pesar de la creciente popularidad de una tecnología que cada vez resulta más fácil de usar, la mayoría de los estudios publicados desde principios de los noventa parece confirmar las conclusiones previas: como soporte para la lectura, el papel sigue ofreciendo más ventajas que la pantalla. Tomados en conjunto, los ensayos en laboratorio, las encuestas a usuarios y los informes de los consumidores indican que los dispositivos digitales impiden explorar textos largos de manera eficiente, una circunstancia que puede afectar de modo sutil a la comprensión lectora. Leer en pantalla puede también consumir más recursos mentales que hacerlo en papel y, en ocasiones, los textos se recuerdan ligeramente peor. Aunque no sean conscientes de ello, muchas personas abordan el contacto con un ordenador o una tableta en un estado mental menos proclive al aprendizaje que cuando se ponen delante de un papel. Y los reproductores de libros electrónicos tampoco consiguen recrear la experiencia táctil de los libros tradicionales, lo que incomoda a algunas personas.

«La lectura comporta un aspecto físico», opina Maryanne Wolf, psicóloga cognitiva de la Universidad Tufts. «Tal vez más de lo que estamos dispuestos a considerar.»

PAISAJES TEXTUALES

Para entender las diferencias entre la lectura en papel y en pantalla, conviene comenzar recordando algunos detalles sobre cómo asimila el cerebro el lenguaje escrito. Aunque las letras y las palabras son símbolos que representan sonidos e ideas, el cerebro las interpreta también como objetos materiales. Como explica Wolf en su libro *Cómo aprendemos a leer* (2008), no nacemos con circuitos cerebrales especializados en la lectura, pues la escritura no se inventó hasta el cuarto milenio a.C., una fecha relativamente reciente en nuestra historia evolutiva. Durante la infancia, el cerebro improvisa un nuevo circuito para la lectura entretejiendo fibras nerviosas dedicadas en principio a otras facultades, como el habla, la coordinación motora o la visión.

Algunas de esas regiones cerebrales se especializan en identificar objetos: nos permiten diferenciar al instante una manzana de una naranja a partir de sus rasgos, al tiempo que las categorizan como frutas. De manera similar, cuando aprendemos a leer y escribir, empezamos por identificar las letras según su disposición particular de líneas rectas, curvas y espacios vacíos: un proceso de aprendizaje táctil que exige la intervención de los ojos, pero también de las manos. En un trabajo reciente, Karin James, de la Universidad de Indiana en Bloomington, observó que cuando los niños de cinco años escribían a mano, los circuitos neurales asociados a la lectura bullían de actividad; sin embargo, eso no sucedía cuando pulsaban las letras en un teclado. Y cuando una persona lee caracteres en cursiva o intrincados, como los *kanji* japoneses, la actividad cerebral reproduce los movimientos de la escritura, incluso si no se tiene nada en las manos.

Aparte de tratar cada letra como un objeto material, el cerebro también puede percibir un texto en su totalidad como una especie de paisaje físico. Al leer, construimos una representación mental del texto. La naturaleza exacta de tales representaciones

PÁGINAS ANTERIORES: KYLE BEAN

no está clara todavía, pero algunos investigadores consideran que se asemejan a los mapas mentales que nos formamos del terreno —de montes o senderos, por ejemplo— o de espacios interiores, como apartamentos u oficinas. Los lectores admiten que, cuando tratan de localizar un pasaje determinado en un libro, a menudo recuerdan su ubicación en el texto. Al igual que podríamos recordar haber pasado junto a una granja pintada de rojo antes de comenzar a subir por un sendero en mitad del bosque, tal vez recordemos que la escena del desaire del Sr. Darcy a Elizabeth Bennet durante un baile aparecía en la esquina inferior izquierda de una página par en uno de los primeros capítulos de *Orgullo y prejuicio*.

En la mayoría de los casos, los libros en papel poseen una topografía más evidente que los textos en pantalla. Un libro abierto presenta al lector dos dominios muy bien definidos, la página izquierda y la derecha, así como ocho esquinas para orientarse. Incluso podemos sentir en la mano izquierda el grosor de la parte que ya hemos leído y, en la derecha, el de la que nos queda por leer. Pasar las páginas de un libro es como ir dejando huellas en un sendero: el acto posee un ritmo propio y deja un registro visible de nuestro avance. Todas estas propiedades no solo hacen que nos resulte más fácil explorar el texto en un libro de papel, sino que nos ayudan a formar un mapa mental coherente del escrito.

La mayoría de los dispositivos electrónicos, en cambio, interfieren con esa manera intuitiva de explorar un texto, lo que dificulta que el lector se forme un mapa mental de su viaje. Al leer un texto digital, podemos subir y bajar por una riada continua de palabras, avanzar una página con una sola pulsación o emplear la herramienta de búsqueda para localizar una frase, pero no es fácil hacerse una idea de la localización de un pasaje en el conjunto del texto. A modo de símil, imaginemos que Google Maps nos permitiera recorrer las calles una por una y teletransportarnos al lugar que le indicásemos, pero sin ofrecernos una vista del barrio, la ciudad o el país en el que estamos. En este sentido, las barras de progreso de un dispositivo electrónico nos proporcionan una noción más vaga del lugar del texto en que nos encontramos que la sensación de peso de las páginas leídas y por leer. Y aunque los reproductores de libros electrónicos imitan la paginación, las páginas que nos presentan son efímeras: una vez leídas, se esfuman. En lugar de recorrer a pie el sendero, vemos desfilar imágenes de árboles, musgo y rocas, sin dejar un rastro tangible de lo que ocurrió antes y sin una forma sencilla de ver lo que nos espera más adelante.

Puede que el cerebro perciba un texto en su totalidad como una especie de paisaje. Al leer, construimos una representación mental del texto no muy distinta de los mapas mentales que nos formamos del terreno o de los espacios interiores

«Parece que ese sentimiento implícito de saber en qué punto del libro estamos importa más de lo que pensábamos», señala Abigail J. Sellen, investigadora de Microsoft Research Cambridge y autora del libro *The myth of the paperless office* («El mito de la oficina sin papeles»; MIT Press, 2001). «No empezamos a echarlo en falta hasta que nos vemos con un libro electrónico en las manos. No creo que los fabricantes se hayan parado a pensar lo suficiente cómo visualizar qué parte del libro estamos leyendo.»

LECTURA FATIGOSA

Algunos estudios sugieren que la lectura en pantalla podría dificultar la comprensión lectora precisamente por difuminar esa sensación de estar ubicado en el texto. En un estudio realizado en enero de 2013 por Anne Mangen, de la Universidad de Stavanger, y otros colaboradores, 72 alumnos de secundaria estudiaron un texto expositivo y uno narrativo; la mitad los leyó en papel; la otra, en formato PDF. Seguidamente, los niños fueron sometidos a pruebas de comprensión lectora en las que, si querían, podían consultar los textos. Quienes los leyeron en el ordenador rindieron algo peor, muy probablemente porque tenían que subir y bajar a lo largo del documento o clicar para saltar de sección a sección, mientras que quienes leían en papel tenían en sus manos el texto completo y podían cambiar de página con rapidez. «La facilidad para encontrar el principio, el final y todo el texto intermedio, así como la conexión constante con el camino seguido, con esa progresión del texto, tal vez requieran un menor esfuerzo cognitivo», explica Mangen. «Así quedarían libres más recursos para la comprensión.»

Otros investigadores creen que la lectura en pantalla podría embotar la comprensión debido al mayor esfuerzo mental e incluso físico que supone. La tinta electrónica refleja la luz ambiente casi igual que la tinta de un libro de papel, pero las pantallas de ordenadores, teléfonos y tabletas arrojan luz directamente sobre el rostro. Es cierto que las actuales pantallas LCD resultan menos agresivas para la vista que sus antecesoras de rayos catódicos, pero una lectura prolongada en ellas puede provocar fatiga visual, dolor de cabeza y visión borrosa. En un experimento dirigido por Erik Wästlund, por entonces en la Universidad de Karlstad, los voluntarios que realizaron un test de comprensión lectora en un ordenador puntuaron menos y refirieron mayor estrés y cansancio que quienes lo hicieron en papel.

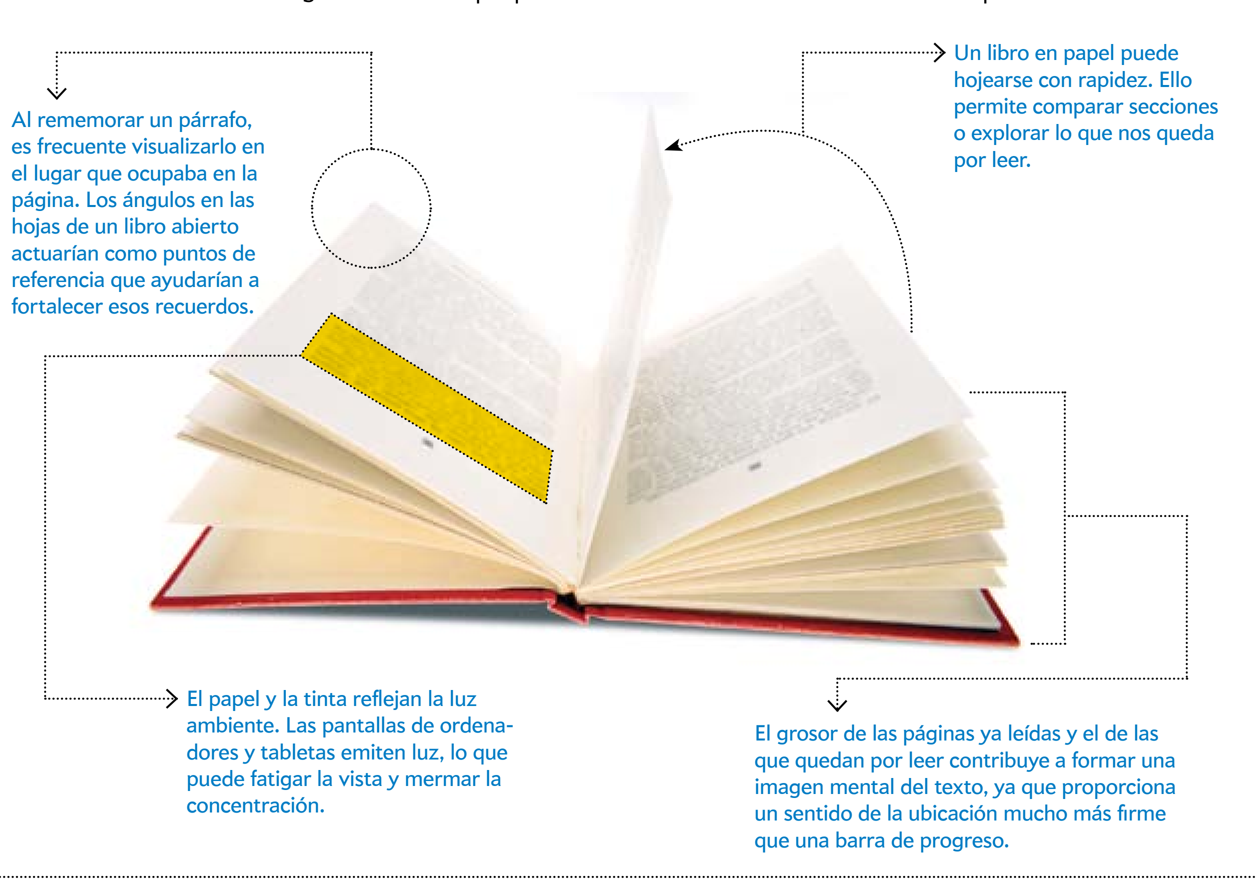
En una serie de ensayos efectuados por Wästlund, 82 voluntarios realizaron un mismo test de comprensión lectora en ordenadores, pero unos lo hicieron con un texto paginado, mientras que otros trabajaron con uno continuo. Los investigadores evaluaron también la atención de los estudiantes y su memoria operativa (un repertorio de destrezas mentales que permiten almacenar información de manera temporal y trabajar con ella). Entre otras tareas, los sujetos tenían que cerrar rápidamente una serie de ventanas que iban apareciendo en la pantalla o recordar dígitos que destellaban. La memoria operativa, como muchas otras facultades cognitivas, es un recurso finito que se aminora con la fatiga.

Aunque los miembros de ambos grupos rindieron por igual en el test, quienes tenían que subir y bajar por un texto continuo puntuaron peor en las pruebas de atención y memoria. Wästlund cree que desplazarse por un texto ininterrumpido, que obliga a los lectores a fijar su atención tanto en el texto como en la manera en que se mueven por él, drena más recursos mentales que pasar una página o hacer clic en ella, gestos más sencillos y automáticos. Cuanta más atención se desvía hacia el movimiento del texto, menos queda disponible para entenderlo. Un estudio realizado en 2004 en la Universidad de Florida obtuvo conclusiones similares.

Por otro lado, algunos estudios recientes subrayan que no solo las pantallas desvían la atención más que el papel, sino que ya desde el principio los lectores tampoco les dedican demasiado

Razones de peso

Numerosos estudios sugieren que comprendemos y recordamos mejor los textos que leemos en papel. Los investigadores creen que puede deberse al carácter físico de este soporte.



ISTOCKPHOTO

esfuerzo. A partir de los datos de un estudio detallado realizado en 2005 con 113 sujetos del norte de California, Ziming Liu, de la Universidad de San José, observó que quienes leían en pantalla tomaban demasiados atajos: invertían más tiempo subiendo y bajando por el texto y buscando palabras clave. También era más frecuente que leyesen un documento una sola vez.

Al leer en pantalla, las personas parecen menos inclinadas a implicarse en lo que los psicólogos llaman «regulación metacognitiva del aprendizaje»; es decir, en fijarse objetivos concretos, releer los pasajes difíciles y comprobar sobre la marcha cuánto han entendido. En un experimento efectuado en el Instituto Technion de Haifa, en Israel, varios estudiantes universitarios realizaron una prueba de tipo test sobre el contenido de un texto de carácter expositivo, en unos casos en papel, y en otros, en un ordenador. La mitad de los participantes solo dispuso de siete minutos para estudiar el texto, mientras que a la otra mitad se le permitió revisar el escrito tantas veces como quisieran. Todos aquellos que se vieron obligados a leerlo deprisa lo hicieron igualmente bien, tanto si habían trabajado en el ordenador como si lo habían hecho en papel. Sin embargo, entre quienes podían administrarse el tiempo a su voluntad, quienes usaron papel puntuaron en torno a un 10 por ciento más. Presumiblemente, porque se tomaron el examen más en serio que sus compañeros y emplearon su atención y su memoria operativa con mayor eficacia.

Si bien es cierto que otros estudios han registrado pocas diferencias en la comprensión lectora, puede que, a largo plazo, quienes leen en pantalla no recuerden los textos tan concienzudamente. En una investigación realizada en 2003 por el equipo de Kate Garland, por entonces en la Universidad de Leicester, se pidió a 50 universitarios que leyeran textos de un curso de introducción a la economía, bien en un monitor, bien en un tomo encuadernado en espiral. Pasados 20 minutos, los investigadores hicieron una prueba a los participantes. Todos ellos puntuaron igual de bien, pero se observaron diferencias en la manera en que unos y otros recordaban la información.

Los psicólogos distinguen entre recordar algo (una forma de memoria relativamente débil, en la que el sujeto evoca cierta información acompañada de detalles del contexto, como dónde y cuándo la aprendió) y saber algo, que se asocia a una memoria más robusta, definida como la certidumbre de que algo es verdadero. En el test de Garland, los voluntarios debían marcar la casilla que creían correcta y, además, otra en la que habían de explicitar si «sabían» la respuesta o si la «recordaban». Quienes habían leído su material en pantalla se apoyaron mucho más en el recuerdo que en el conocimiento, mientras que quienes utilizaron papel emplearon por igual ambas formas de memoria. Garland y sus colaboradores creen que los sujetos que estudiaron en papel aprendieron más a fondo y más rápido los

contenidos. No tuvieron que dedicar largo tiempo a rebuscar en su memoria la información del texto; a menudo, simplemente sabían la respuesta.

Puede que las diferencias en comprensión lectora mengüen a medida que evolucione la actitud del público hacia la pantalla. Tal vez la pequeña protagonista de *A magazine is an iPad that does not work* crezca sin el sutil prejuicio contra las pantallas que parecen mostrar las generaciones anteriores. Las investigaciones más recientes, sin embargo, sugieren que sustituir el papel por pantallas a edades muy tempranas conlleva desventajas que no deberían obviarse. En un estudio realizado en el Centro Joan Ganz Cooney de Nueva York, en el que participaron 32 parejas de padres y niños de entre tres y seis años, se observó que los pequeños recordaban más detalles de los cuentos leídos en papel que de los libros electrónicos con animaciones interactivas, vídeos y juegos. Al parecer, esos aderezos apartaban la atención del cuento y la desviaban hacia el aparato. En un trabajo posterior realizado con 1226 padres, la mayoría afirmó que tanto ellos como sus hijos preferían los libros impresos a los electrónicos cuando leían juntos.

Resultados casi idénticos obtuvieron dos estudios publicados el pasado mes de septiembre en *Mind, Brain and Education* por Julia Parrish-Morris, ahora en la Universidad de Pensilvania, y otros colaboradores. Cuando los padres leían libros impresos a sus hijos de entre tres y cinco años, solían relacionar los cuentos con aspectos de la vida del niño. Pero, al leer en una consola electrónica con efectos sonoros muy popular por entonces, los padres tenían a menudo que interrumpir su «lectura dialógica» para evitar que el niño juguetease con los botones y perdiera el hilo de la narración. Tales distracciones acabaron impidiendo que los niños de tres años captaran incluso el argumento principal del cuento, mientras que todos los niños que leyeron en libros de papel siguieron bien la historia.

Todas esas investigaciones preliminares sobre los lectores más jóvenes ponen de manifiesto la que puede que sea la principal ventaja del papel: su modestia. Es cierto que los textos digitales ofrecen claras ventajas en situaciones muy diversas. Si hemos de documentarnos sobre un tema y se acerca la fecha límite, la facilidad que comporta acceder a cientos de textos digitales y buscar en ellos las palabras clave compensa con creces los beneficios de comprensión y retención que nos reportaría ir a una biblioteca, buscar todos los libros necesarios y examinarlos laboriosamente uno por uno. Para las personas con deficiencias visuales, poder ajustar el tamaño del texto en una pantalla de alto contraste supone, sin duda, un regalo del cielo. Pero, a diferencia de las pantallas, el papel rara vez reclama la atención para sí o nos distrae del texto. Por su sencillez, el papel es «un punto fijo, un anclaje para la consciencia», como escribe William Powers en su ensayo *Hamlet's Blackberry: Why paper is eternal* («La Blackberry de Hamlet: Por qué el papel es eterno»). La gente asegura una y otra vez que, cuando realmente desea concentrarse en un texto, lo lee en papel. En una encuesta realizada en 2011 a estudiantes de posgrado de la Universidad Nacional de Taiwan, la mayoría aseguraba que solía echar un vistazo a unos cuantos párrafos de los documentos en línea para, después, imprimir el texto y leerlo con detalle. En 2003, en una encuesta realizada en la Universidad Nacional Autónoma de México, casi el 80 por ciento de los estudiantes prefería leer en papel para «comprender los textos con claridad».

Consideraciones pragmáticas aparte, nuestros propios sentimientos sobre el papel y sobre los reproductores electrónicos —así como el efecto que produce sostenerlos en la mano— también condicionan si acabaremos comprando un libro en edición de tapa dura en nuestra librería o si lo descargaremos desde la página de Amazon. Tanto las encuestas como los informes de los consumidores sugieren que los aspectos sensoriales de la lectura en papel importan más de lo que cabría pensar: el tacto del papel, el olor de la tinta, la posibilidad de alisar o doblar una página con los dedos, el peculiar sonido de las hojas al irlas pasando... Hasta la fecha, los formatos digitales no han sabido reproducir bien tales sensaciones. Los libros de papel tienen también un tamaño, forma y peso muy discernibles. Podemos referirnos a un ejemplar en tapa dura de *Guerra y paz* como un «tomo pesado» o a una edición de bolsillo de *El corazón de las tinieblas* de Conrad como un «volumen delgado». Sin embargo, aunque la longitud de un texto digital pueda representarse en pantalla, los libros electrónicos no tienen grosor ni forma diferenciada. Un dispositivo siempre pesa lo mismo, tanto si leemos la obra maestra de Proust como si se trata de un cuento corto de Hemingway. Ciertos investigadores han señalado que estas diferencias generan una disonancia táctil que disuade a algunas personas de leer libros electrónicos.

Para enmendar esta incongruencia sensorial, numerosos diseñadores se han afanado para que leer en tableta o en reproductores de libros electrónicos se asemeje lo máximo posible a la lectura en papel. La tinta electrónica guarda un gran parecido con la tradicional, y la sencilla disposición de la pantalla de un Kindle recuerda mucho a la página de un libro de papel. En la misma línea, la aplicación iBooks, de Apple, intenta remedar la vuelta de página. Pero, hasta el momento, esos gestos han tenido más de estético que de práctico. En los libros electrónicos sigue siendo difícil pasar muchas páginas de una vez o volver rápidamente a un capítulo anterior cuando nos viene a la memoria una frase o concepto ya leído.

Algunas innovaciones digitales recientes buscan algo más que imitar el papel. Intentan que la lectura en soportes electrónicos evolucione hacia algo completamente nuevo. Desplazarse arriba y abajo por la pantalla puede que no sea la manera ideal de leer *Moby Dick*, pero algunos diarios, como *The New York Times* y otros medios digitales, han creado artículos hermosos, visualmente muy atractivos e imposibles de presentar en papel porque conjugan texto, vídeos y sonido en un formato que depende por completo de la facultad para moverse de un lado a otro de la pantalla. Robin Sloan ha sido pionero del «ensayo al toque» (*tap essay*), que se basa en la interacción física con la pantalla para determinar el ritmo y el tono, así como para hacer aparecer nuevas palabras, frases o imágenes a medida que se pasa el dedo por la pantalla táctil de una tableta o de un teléfono móvil. Algunos autores se han asociado con programadores informáticos para producir textos interactivos cada vez más refinados, en los que sean las preferencias del lector las que determinen qué se leerá, oirá o verá a continuación.

Si se trata leer con atención un texto largo y sin adornos, puede que el papel y la tinta aún lleven la ventaja. Sin embargo, el texto llano no agota las posibilidades de la lectura.

PARA SABER MÁS

The myth of the paperless office. Abigail J. Sellen y Richard H. R. Harper. MIT Press, 2001.
Cómo aprendemos a leer: Historia y ciencia del cerebro y la lectura. Maryanne Wolf. Ediciones BSA, 2008.

por Marc Boada Ferrer



Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.

Las artes del carbonero

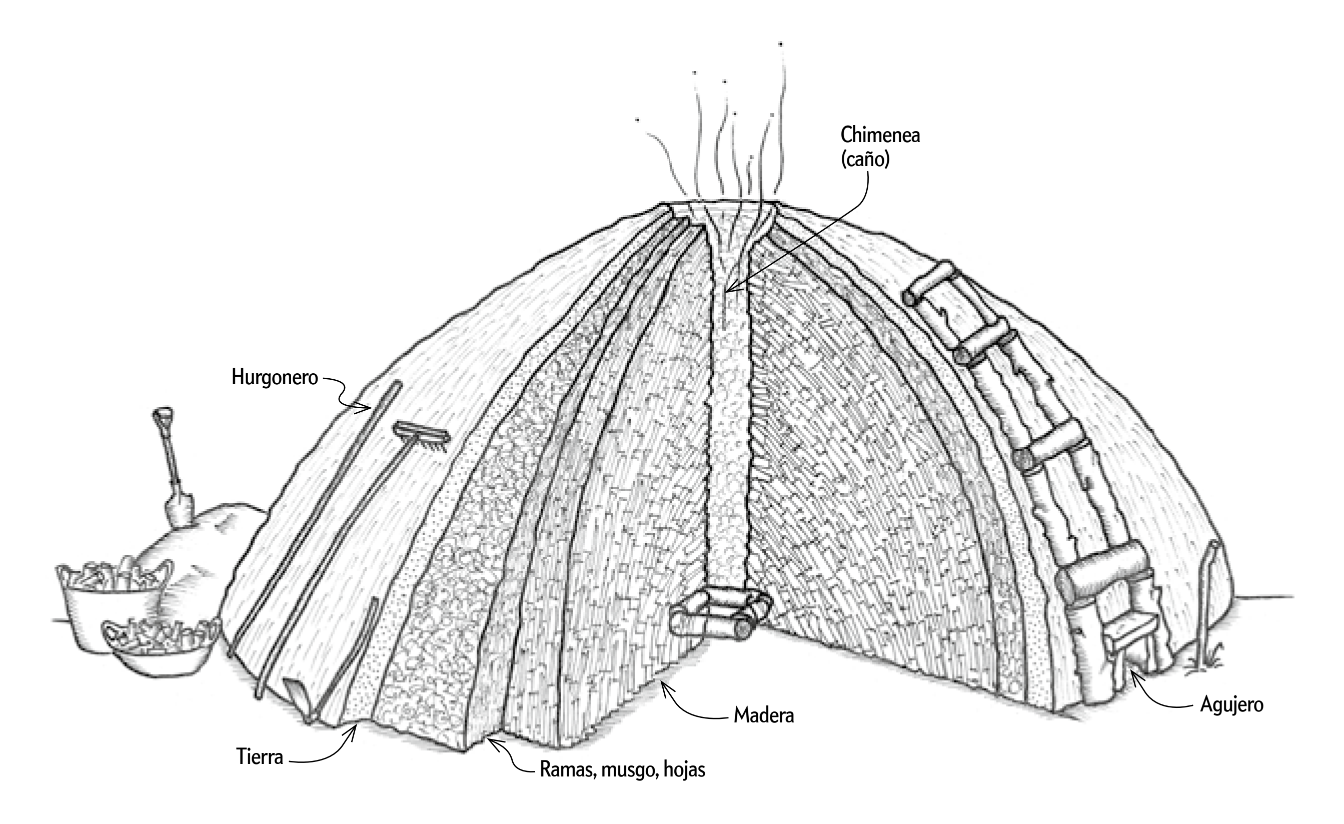
La obtención de carbón vegetal a partir de madera permite recuperar una técnica ancestral y realizar interesantes observaciones etnográficas

Poco más que leña, tierra y voluntad son necesarias para producir por nuestros medios un valioso material para la experimentación. Nos referimos al carbón vegetal, antaño de extendido uso y hoy solo reservado a la barbacoa dominical. Derrotado por la competencia de otros combustibles más «prácticos», su obtención tradicional pronto se habrá extinguido. Y con ella desaparecerá una rica cultura ancestral anclada en nuestros bosques, preservada solo por los más ancianos del lugar.

Para el científico, la obtención de carbón vegetal se basa en un proceso termoquímico que tiene por objeto fragmentar las larguísimas moléculas poliméricas que conforman la materia vegetal para quedarse al final con un esqueleto de carbono prácticamente puro. Es lo que se denomina pirólisis. Para conseguirlo, deberemos construir un reactor donde se llevarán a cabo múltiples transformaciones químicas: la pila carbonera. En su interior, el oxígeno será escaso y la energía térmica necesaria correrá a expensas del propio combustible.

Sus variantes son tantas como valles, comarcas o regiones hay en nuestra geografía. Por suerte, pese a la increíble diversidad de métodos, hay comunes denominadores que nos pueden guiar a falta de algún carbonero jubilado que pueda asesorarnos —en caso de conocer uno, no dudaremos en seguir fielmente sus indicaciones—. Aún más, este es quizás uno de los experimentos más románticos y de mayor valor estético que el experimentador con intereses antropológicos puede plantearse; tras el durísimo trabajo del carbonero se esconde una épica cargada de leyendas, relatos populares y localismos dignos de ser conservados.

Empezaremos por lo esencial: la obtención de la leña, procedente de la entresaca o la poda de bosques gestionados racionalmente. Escogeremos para ello maderas duras, de encina, roble o haya (a falta de estas especies podemos utilizar cualquier madera, como comprobaremos si analizamos una muestra de carbón comercial). El peso total deberá ser proporcional a nuestra pericia y capacidad de trabajo. Los carboneros expertos no dudan en construir pilas de 50 toneladas de leña y más 4 metros de altura, auténticos «monstruos» que echan humo durante seis o siete semanas. En mi caso, he ensayado con carboneras de entre cinco y siete toneladas, con tiempos de cocción



DIBUJOS Y FOTOGRAFÍAS CORTESÍA DEL AUTOR

que rondan las tres semanas. Quizá lo mejor sería iniciarnos con una pila de centenares de kilos, de poco más de un metro de altura, manejo fácil y con un tiempo de cochura de días.

La madera seccionada en troncos largos la acercaremos al lugar donde construiremos la pila, la plaza carbonera o simplemente el «sitio». Allí, con la motosierra, la cortaremos en trozos dimensionados en función de varios parámetros. Por ahora, lo único que debemos saber es que en una pila pequeña solo se puede carbonizar leña menuda, de algunos centímetros de diámetro. Las de gran tamaño, en cambio, son capaces de pirolizar en su núcleo troncos de casi treinta centímetros de espesor. La plaza la situaremos en un lugar ventilado, alejado de cualquier vivienda y deseablemente próximo a un cobijo donde dormir. Nivelaremos el espacio y amontonaremos la tierra superficial sobrante, reservándola para su posterior uso.

Para armar la pila, empezaremos por delimitar un cajón cuadrado de más de un palmo de luz (lo que será su centro), con cuatro troncos de los más gruesos. Sobre estos apilaremos otros inclinados, también robustos; primero muy cortos y luego progresivamente más largos. Obsérvese que la forma final es la de un cono con la ladera ligeramente convexa; dado que los leños deben formar segmentos, no pueden ser excesivamente largos. Tres o cuatro palmos son el máximo posible en una pila voluminosa; para las pequeñas, un palmo es más que suficiente.

Al elevar la pila debe dejarse un hueco central sobre la caja que habíamos construido en su centro, la chimenea o caño. Ello puede resolverse de mil formas, según las usanzas locales. La más simple consiste en dejar un hueco perfectamente vertical de unos treinta o cuarenta centímetros de diámetro (*esta es la opción que se muestra en la ilustración*). En otros lugares se entiba mediante largos troncos verticales entre los que se interponen otros que garantizan la estabilidad del conjunto. Sea como fuere, poco a poco y de forma ordenada se sitúan los leños, procurando que queden muy bien encajados, disminuyendo progresivamente su tamaño hacia el exterior.

Terminado el apilamiento, deben protegerse los troncos de una combustión rica en oxígeno. De nuevo, las opciones son múltiples. En la zona atlántica podemos recubrir toda la pila (exceptuando el ojo de la chimenea) con una generosa capa de hojas secas de haya; en otros lugares se prefiere recurrir al musgo; en la zona mediterránea, donde ambos recursos escasean, es tradición disponer sobre la leña ramas bien cargadas de hojas. Antes, sin embargo, deberemos prensar estas ramas: formaremos grandes montones sobre los que colocaremos, durante varios días, unos gruesos troncos que las presionarán mientras secan un poco. Cuando se extraen de la prensa, semejan enormes abanicos con los que cubriremos la pila empezando por la base y con los pedúnculos apuntando al cielo. Luego, sobre esta capa vegetal se dispone un nuevo estrato, el último, de tierra.

Mucho se ha hablado sobre cómo debe ser esta tierra —según las tradiciones más ortodoxas, no sirve cualquiera—. Líneas atrás hemos dicho que reservaríamos la capa superficial de nuestra flamante plaza carbonera. La primera vez raramente es óptima. Deberemos eliminar las piedras y cualquier otra impureza que pueda comprometer su estanqueidad. Dado que su función será impedir que el oxígeno atmosférico penetre en la pila, debe mostrar cierta cohesión, fruto de una granulometría reducida y la humedad. Si el terreno es arenoso, podemos añadir unos capazos de material arcilloso; si es muy pesado, agregaremos tierra ligera. Y no estará de más arrimar una buena cantidad de ceniza, el componente mayoritario de la tierra más valorada, la de una carbonera antigua, riquísima en carbón muy menudo procedente de incontables campañas anteriores, quizá de hace siglos. El control de calidad es sencillo: comprimida en el puño, la tierra debe mantener su forma y presentar cierta resistencia a la rotura.

Cerneremos la tierra, la humedeceremos ligeramente, la trabajaremos a fondo con la azada hasta que sea homogénea y la colocaremos, volcándola a espuertas, sobre la pila, ya perfectamente recubierta con ramas, musgo u hojarasca. Formaremos una capa generosa y regular que empezaremos por la base hasta culminar en el pináculo. Para una pila de pocas toneladas y un diámetro de dos o tres metros, el volumen requerido de este último recubrimiento alcanza como mínimo los dos metros cúbicos.

Llegados a este punto, nuestro reactor pirolítico se halla listo para su encendido. Para el neófito en el carboneo es un momento emocionante: tras días de esfuerzo físico tiene ante sí el reto de quemar controladamente miles de kilos de madera sin convertirlo todo en ceniza. Encendamos









COCCIÓN DE UNA PILA carbonera durante cuatro semanas. Obsérvese la reducción de tamaño.

un fuego anexo, bien vivo, y preparemos un montón de tizones encendidos. Con una escalera accederemos a la cúspide de la carbonera y con una pala arrojaremos por el ojo de la chimenea las brasas y tizones; cuatro o cinco dosis serán suficientes. Mejor si apartamos la cara; lo más probable es que una fuerte ráfaga de aire caliente cargado de chispas ascienda para quemarnos las cejas sin piedad. Deberemos acostumbrarnos a este tipo de incidentes, puesto que en los próximos días el humo y el fuego serán nuestros compañeros inseparables.

Saltemos ahora de la escalera para abrir en la base de la pila un agujero. Un palo corto y aguzado, el humero, nos permitirá atravesar la capa de tierra, las hojas y abrirnos paso entre los maderos, permitiendo así el paso del aire. Protegeremos la boca de este agujero conformando con tres piedras un pequeño portal. Observaremos que el humo que sale por la chimenea gana fuerza. Tras unos minutos, subiremos de nuevo a la escalera y, con la máxima precaución, atisbaremos entre la humareda el fondo de la chimenea. Si apreciamos brasas o, mejor aún, llamas, habrá llegado el momento de alimentar la pila.

Para ello tiraremos por el ojo de la chimenea un capacho de leña aserrada muy en corto, pieza a pieza, que comprimiremos primorosamente ayudándonos con un largo palo, normalmente de castaño, el hurgonero. Esperemos de nuevo a que la llama suba; quizás una hora o dos al principio, luego tres o cuatro. Repitamos el proceso sin prisas, vigilando y calibrando el humo denso y abundante que sale a borbotones, sin precipitarnos en alimentar. Poco a poco, el agujero central quedará relleno, algo que puede tardar un par de días para una pila pequeña. Durante esta fase, deberemos cebar también de noche, despertándonos regularmente a horas intempestivas para controlar que todo se desarrolla correctamente, atentos sin tregua al humo, a sus colores y texturas. En algunos lugares el relleno se hace de una sola vez, eso sí, se enciende con generosidad, incluso con gasolina. No es menos frecuente que la chimenea se tape con una cubierta vegetal (césped arrancado con la azada), formando un tapiz que se coloca sobre la boca con la parte herbácea hacia el interior, dejando tan solo un agujero del tamaño de un puño por el que escaparán vapores densísimos.

Tras estos primeros jornales cebando la pila, procederemos a su cerrado definitivo: obturaremos herméticamente la chimenea y abriremos varios agujeros en su lateral. En otras comarcas estas boqueras se inician cerca de la corona y se abren progresivamente otras nuevas a cotas más bajas. Otros carboneros prefieren hacerlo casi desde la base. Y en algunos modelos de pilas, no cónicas sino prismáticas, existe solo una boquera en el extremo opuesto al punto de encendido.

En cualquier caso, para deducir cómo avanza el proceso de pirólisis deberemos atender a los signos que nos muestre el humo. Se trata de una sustancia densa, blanca y húmeda (notamos la humedad si calamos la mano en su interior). Corresponde a los fluidos de combustión generados en el núcleo de la pila, pero también a la evaporación del agua que impregna la leña, que, poco a poco, incrementa su temperatura hasta unos doscientos grados. Estamos pues en una fase de secado.

Tras unos días, el humo muda su color para ganar en tintes ocres; aumenta su poder sofocante, densidad (transporta partículas) y desprende un olor acre y penetrante, debido a la presencia de gases tóxicos. Hemos entrado en la fase real de pirólisis a una temperatura mucho más elevada. Si pudiéramos analizar su composición descubriríamos un vasto catálogo de compuestos orgánicos. Al vapor de agua, óxidos de carbono e hidrógeno se suman los productos de la descomposición de la hemicelulosa, la celulosa y la lignina, y también de la savia, las resinas, taninos, etcétera. Así pues, tras la rotura térmica de los enlaces de estos compuestos orgánicos, lo que escapa por los humeros son breas, alquitranes, ácido piroleñoso, acetonas y alcoholes, y otras muchas sustancias que podemos estudiar mediante la condensación de los vapores —que nos cuidaremos mucho de respirar— en un serpentín refrigerado.



LA MADERA CARBONIZADA es frágil. Al golpearla, emite un sonido metálico.

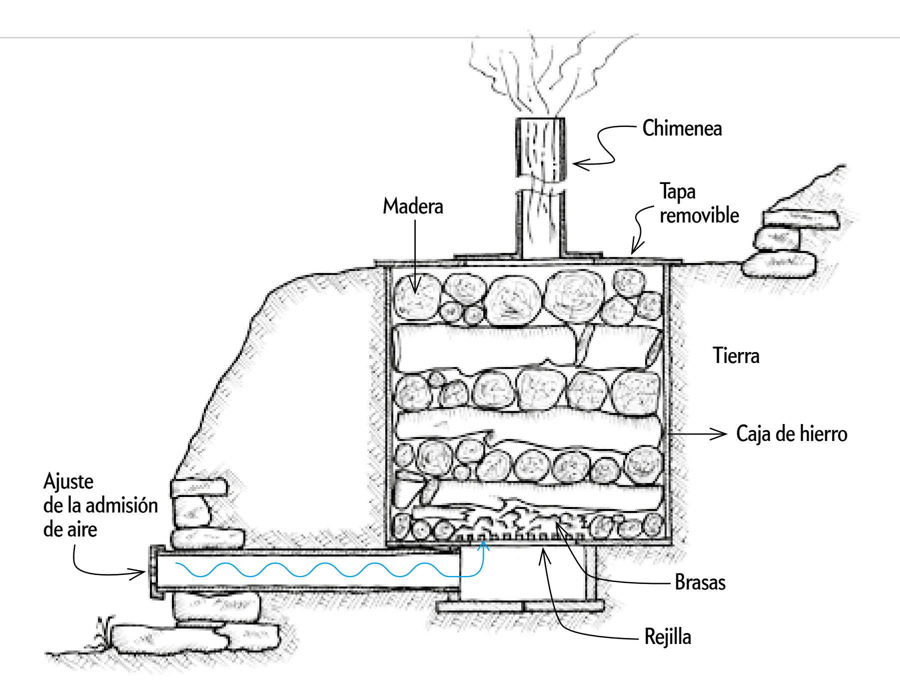
Mientras avanza la pirólisis de una zona de la pila, el humo que sale por la boquera más próxima mantiene ese carácter. Sin embargo, cuando ha terminado la fragmentación e incineración parcial de las moléculas largas, la combustión se realiza ya solo a expensas del carbono. El humo de nuevo muda radicalmente: olor agradable, color azulado y mayor transparencia. El carbonero, atento a estos indicios, deberá reaccionar rápidamente: será el momento de tapar el agujero por donde escape, para abrir otro a cierta distancia, del que nuevamente brotará una columna de vapores asfixiantes. Así, al son de los vahos exhalados por la pila, pirolizaremos por zonas todo el conjunto.

Como decíamos, no es nada fácil. Mil peligros se interponen entre la madera y el carbón. El más temido: el fuego con llama. El carbonero no solo mira el humo; también trabaja activamente con la pala (o un buen palo), golpeando regularmente toda la carbonera. Pala o palo nos dan pistas sobre el estado del material. La leña en crudo suena a cosa dura; la carbonizada cruje, se fragmenta y se comprime, reduciendo notablemente el tamaño de la pila.

Detectaremos así los puntos donde el fuego ha trabajado en demasía, en cuyo caso deberemos actuar con presteza, so pena de encontrarnos ante un fuego que lo reduzca todo a cenizas. Retiraremos las coberturas y el carbón que pueda haber y accederemos resueltamente a golpe de azadón hasta los tizones encendidos, que mojaremos muy cautelosamente con un poco de agua. Reconstruiremos luego la pila con leña en verde, perfectamente dispuesta para no dejar espacio al aire, y colocaremos de nuevo una generosa cobertura.

El carbonero trabaja de pie sobre la propia pila, sintiendo el carbón bajo sus pies, percibiendo sus funestos crujidos y arriesgándose a hundirse en ella. Y el peligro amenaza no solo al carbonero; también lo hace con el carbón, ya que cuando la cocción ha avanzado, cualquier derrumbe en el recubrimiento se convierte en un potente fuego a cielo abierto. La única opción es no bajar nunca la guardia. Seguiremos vigilando la pila cada pocas horas, incluidas las nocturnas.

Pasadas unas semanas, la pila ya no emite vapores densos. La tierra exterior está caliente, a veces reseca. Percibimos con la mano el fuego a pocos centímetros de profundidad; oímos claros crujidos



CAJA METÁLICA **para la carbonización rápida de pequeñas partidas de madera.**

en su interior. Ha llegado el momento de cerrar todos los poros y esperar algunos días a que se enfríe. Por fin, abriremos la pila por sectores, lentamente y esparciendo el carbón por los alrededores para que se temple. Apagaremos las brasas con presteza, para evitar que el fuego se reinicie con virulencia.

Si todo ha ido bien, hallaremos los troncos muy completos y totalmente carbonizados. Son frágiles. Si los sonamos, emitirán una alegre «música», casi metálica, síntoma inequívoco de un carbón de primera calidad. Incluso una pila pequeña rinde centenares de kilos de tan apreciada materia. Descubriremos también que no toda la leña se ha carbonizado: al menos los troncos en contacto directo con el suelo han resistido ante la acción del fuego; están muy secos y endurecidos, pero no carbonizados. (Los antiguos carboneros los agrupaban en una nueva pila, mucho más pequeña, que cocían en pocos días.) Puede ser también —lo que es mucho peor—, que no hayamos dado el tiempo o temperatura suficientes para carbonizar el conjunto. Hay que reconocerlo: el comportamiento de una carbonera es errático y depende de múltiples factores. Temperatura, humedad ambiental y del combustible, tipo de tierra y viento hacen que la producción sea irregular.

Para resolver ese problema, podemos realizar la cocción en una caldera metálica, donde el control preciso del oxígeno y la total estanqueidad del conjunto facilitan el proceso. He ensayado con éxito el carboneo en un recipiente cúbico de hierro, de medio metro de arista, enterrado en un pequeño cúmulo de tierra. En su interior, los maderos que queremos carbonizar se disponen en hiladas horizontales, orientadas a 90º entre capas. El fuego se inicia en el centro, también con ascuas encendidas. Con prontitud y decisión se coloca la madera; se cierra luego con una tapa de hierro de 4 o 5 milímetros de espesor y con un agujero en el centro, y un tubo metálico que hará de chimenea. El aire llega por abajo, a través de una rejilla y de un tubo de estufa de cien milímetros de diámetro, en la boca del cual hay una pequeña válvula para la regulación del tiraje y, por tanto, del oxígeno disponible. El control es casi total y la monitorización de los parámetros como la temperatura de los gases muy fácil.

Con esta disposición y partiendo de madera seca realizaremos la pirólisis en unas 6 o 7 horas. El carbón obtenido se hallará totalmente exento de tierra o piedras. Si sumamos a esto unas horas de enfriamiento (mientras la caja permanece herméticamente cerrada), resulta que podemos cocer una carbonera diaria. Además, para detener el proceso en cualquier momento podemos inyectar pequeñas cantidades de dióxido de carbono.

Sea cual fuere el método de producción, ante los sacos llenos de carbón el experimentador puede proyectar sus próximas acciones. Forjar y fundir metales, cocer cerámicas y vidrios, neutralizar y adsorber productos químicos y muchas más —incluida la barbacoa dominical—, serán ahora posibles.

por Agustín Rayo

Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y autor del libro *The construction of logical space* (Oxford University Press, 2013).



Gödel y la verdad axiomática

Por qué el conocimiento matemático es menos certero de lo que quisiéramos

A veces nuestras mejores teorías científicas resultan estar equivocadas. Así ocurrió con la teoría geocéntrica del universo o con la física newtoniana. Aunque hoy contamos con teorías mejores que aquellas, parece difícil excluir de antemano la posibilidad de encontrar algún fallo más adelante.

Sin embargo, parece natural pensar que las teorías matemáticas son diferentes; que las matemáticas sí nos permiten alcanzar la certeza absoluta. Pero, como veremos a continuación, la situación resulta mucho más compleja de lo que parece. En contra de lo que cabría pensar, hay razones de principio para concluir que las teorías matemáticas tampoco pueden ofrecernos conclusiones infalibles.

Axiomas y demostraciones

Cuando Copérnico propuso la teoría heliocéntrica, justificó su hipótesis argumentando que proporcionaba una explicación más simple del movimiento de los astros que otras teorías rivales. Por desgracia, el hecho de que una hipótesis sea simple no garantiza su veracidad. El argumento de Copérnico confería *plausibilidad* a su hipótesis, pero no la establecía de manera concluyente. (De hecho, hoy sabemos que la suposición de Copérnico era falsa tal y como él la planteó, ya que los planetas no describen círculos alrededor del Sol, sino elipses.)

En cambio, cuando Euclides propuso la existencia de infinitos números primos, justificó su hipótesis con una demostración, la cual derivó a partir de principios muy básicos. Dado que la demostración de Euclides es válida, ello nos garantiza que, si dichos principios son correctos, la conclusión también tiene que serlo. Así pues, resulta natural pensar, que —a diferencia de Copérnico— Euclides sí estableció su hipótesis de manera concluyente.

Tristemente, las cosas no son tan sencillas. El problema reside en que una demostración constituye un resultado *condicional*: nos muestra que una conclusión es verdadera siempre y cuando los principios básicos en los que se basa (los axiomas) también lo sean. Por tanto, para demostrar la veracidad de una proposición matemática no basta con encontrar una prueba. Necesitamos demostrar que los axiomas que hemos empleado también son verdaderos.

Pero ¿cómo saber si un axioma matemático es verdadero? Una posible respuesta consistiría en decir que los axiomas constituyen principios tan básicos que resultan absolutamente obvios: su verdad nos es del todo aparente, sin el menor resquicio para la duda. Por poner un ejemplo, uno de los axiomas de la aritmética establece que dos números diferentes no pueden tener el mismo sucesor. ¿Qué podría ser más obvio que eso?

Por desgracia, en el pasado se han formulado axiomas que parecían igual de obvios y que, sin embargo, resultaron ser falsos.

Teoría de conjuntos

Consideremos la teoría de conjuntos. En matemáticas, es usual aseverar que existe el conjunto formado por todos los números primos y solo por ellos. O que existe el conjunto de todas las funciones que van de los números reales a los números reales, el cual no contiene ningún elemento que no sea una función real. El principio básico que subyace a estas aseveraciones parece ser el siguiente axioma:

> Axioma conjuntista: *Para cualesquiera objetos (como los números primos o las funciones reales) existe un conjunto que tiene como elementos a todos esos objetos, y solo a ellos.*

¿Qué podría ser más obvio que el axioma conjuntista? De hecho, a principios del siglo XX, el gran matemático alemán Gottlob Frege propuso una versión de este principio como una de las «leyes básicas» de su sistema matemático. Sin embargo, y por extraño que parezca, existe una demostración de que el axioma conjuntista no puede ser verdadero.

El hallazgo se debe al filósofo británico Bertrand Russell, quien lo demostró con un argumento sorprendentemente sencillo. Consideremos todos los objetos que no son elementos de sí mismos. No cabe duda de que tales objetos existen. El conjunto vacío constituye un buen ejemplo: dado que carece de elementos, no puede tenerse a sí mismo como elemento. La Luna, sin ir más lejos, nos proporciona otro. Dado que nuestro satélite natural no es un conjunto, tampoco posee elementos, por lo que no puede tenerse a sí mismo como elemento.

Una consecuencia inmediata del axioma conjuntista nos dice que ha de existir un conjunto cuyos elementos vengan dados por todos los objetos que no son elementos de sí mismos, y solo por ellos. En honor a su descubridor, llamaremos R a dicho conjunto.

A la vista de su definición, sabemos que los únicos elementos de R son todos aquellos objetos que tienen la propiedad de no ser elementos de sí mismos. Se sigue, por tanto, que para que R sea elemento de sí mismo, tiene que poseer dicha propiedad. En otras palabras, para que R sea un elemento de sí mismo, tiene que no ser elemento de sí mismo.

Pero ¿es R un elemento de sí mismo? La conclusión del párrafo anterior nos dice que cualquier respuesta a esta pregunta resultará paradójica. Para que R fuese un elemento de sí mismo, tendría que no serlo; pero si no lo fuese, ¡formaría parte de sí mismo!

La lección que podemos extraer del resultado anterior es que el axioma conjuntista es *inconsistente* y que, por tanto, no puede ser verdadero. En consecuencia, ninguna demostración que construyamos a partir del axioma conjuntista nos garantizará jamás la veracidad de la conclusión,

pues, como hemos visto, una demostración solo garantiza que su conclusión es verdadera si los axiomas en los que se basa también lo son.

¿Una solución?

Comencé diciendo que es natural confiar en que las teorías matemáticas nos ofreciesen certezas absolutas. Sin embargo, hemos visto que la situación dista mucho de ser tan sencilla. Las demostraciones matemáticas se basan en axiomas. Pero incluso los axiomas de apariencia más obvia pueden resultar inconsistentes y, por tanto, falsos.

A principios del siglo xx, el matemático alemán David Hilbert propuso un programa para enfrentar el problema. Simplificando mucho, podemos pensar en el programa de Hilbert como basado en dos hipótesis, una matemática y otra filosófica. De acuerdo con la hipótesis matemática, existiría un algoritmo capaz de establecer de una vez por todas si un sistema axiomático dado es consistente o no. Según la hipótesis filosófica, bastaría con que un sistema axiomático fuese consistente para que pudiese ser aceptado como verdadero.

Si ambas hipótesis resultasen correctas, sería posible determinar de manera concluyente si nuestros sistemas axiomáticos son verdaderos o no, al menos en principio. Y, una vez que supiésemos que un conjunto de axiomas es verdadero, podríamos garantizar que cualquier demostración basada en dichos axiomas arrojaría siempre conclusiones verdaderas.

Gödel

Muy a nuestro pesar, existen buenas razones para concluir que la hipótesis matemática que acabamos de enunciar no es correcta. En 1930, el eminente lógico alemán Kurt Gödel anunció un resultado que cambiaría para siempre el rumbo de la filosofía de las matemáticas: el teorema de incompletitud [*véase* «Ordenadores y números naturales», por Agustín Rayo; Investigación y Ciencia, abril de 2012].

A partir de dicho teorema, Gödel dedujo un corolario, hoy conocido como «segundo teorema de Gödel», y que, bajo ciertos supuestos mínimos, afirma lo siguiente:

> *Un sistema axiomático solo es capaz de demostrar su propia consistencia si es inconsistente.*

El segundo teorema de Gödel destruye por completo el programa de Hilbert; por





DAVID HILBERT (*izquierda*) **propuso a principios del siglo xx un programa para justificar la coherencia de los axiomas de la matemática. En 1930, Kurt Gödel (*derecha*) demostraría que dicho programa no es viable.**

lo menos, en la versión simplificada que estamos considerando aquí.

La razón es la siguiente. Una hipótesis bien establecida sostiene que, siempre que alguna pregunta matemática pueda decidirse de manera algorítmica, existe una demostración a partir los axiomas de la aritmética que determina la respuesta. Por tanto, si la hipótesis matemática de Hilbert fuese correcta, y si existiera un método algorítmico para decidir si un sistema axiomático dado es consistente o no, deberíamos ser capaces de demostrar, a partir los axiomas de la aritmética, qué sistemas son consistentes y cuáles no.

Sin embargo, el segundo teorema de Gödel establece que, si los axiomas de la aritmética son consistentes, entonces nunca podremos demostrar a partir de ellos la consistencia de la aritmética. Así pues, si los axiomas de la aritmética son consistentes, la hipótesis matemática de Hilbert no puede ser correcta. Es, por tanto, imposible que exista un método algorítmico que nos permita decidir qué sistemas axiomáticos son consistentes y cuáles no.

Matemáticas sin cimientos

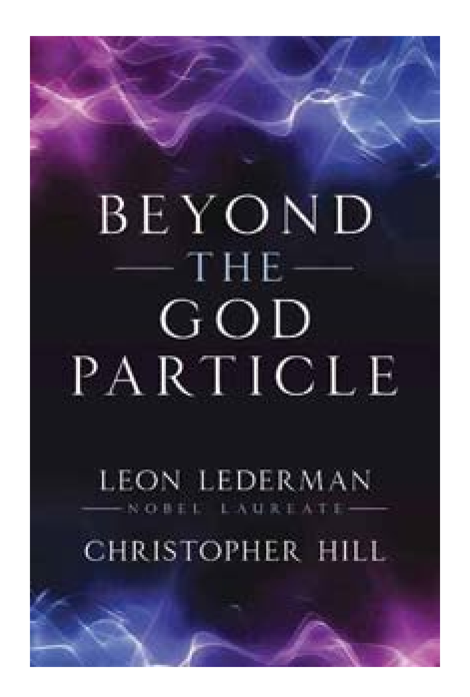
Acabamos de ver que, en virtud del teorema de Gödel, no parece nada claro que exista ningún método concluyente para verificar la consistencia de un sistema axiomático dado.

Es cierto que nadie alberga dudas serias acerca de la consistencia de los sistemas axiomáticos que utilizamos en la práctica. Pero ello no se debe a que tengamos un método categórico para excluir la posibilidad de que sean inconsistentes. Más bien, lo que sucede es que, en multitud de casos, los matemáticos se encuentran lo bastante familiarizados con sus sistemas axiomáticos como para confiar en que no surgirán problemas. Pero, como descubrió Frege, tales predicciones no siempre resultan acertadas.

La moraleja de nuestra reflexión es que no queda claro que nos encontremos en posición de decretar la certeza absoluta de nuestras teorías matemáticas. Como en el caso de las mejores teorías empíricas, contamos con excelentes razones para pensar que nuestras teorías matemáticas son verdaderas. Sin embargo, en ninguno de los dos casos esas razones son tan buenas como para garantizar la certeza absoluta.

PARA SABER MÁS

La columna presenta una versión terriblemente simplificada del programa de Hilbert. Para profundizar en los detalles, puede consultarse la entrada correspondiente de la *Stanford Encyclopedia of Phylosophy*: **plato.stanford.edu/entries/hilbert-program**



BEYOND THE GOD PARTICLE

Por Leon Lederman y Christopher Hill.
Prometheus Books, Nueva York, 2013.

Bosón de Higgs

Su importancia en la consolidación del modelo estándar

El 4 de julio de 2012 se descubrió el bosón de Higgs en el mayor acelerador del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) de Ginebra. El LHC, del Consejo Europeo para la Investigación Nuclear (CERN), está consagrado a la investigación básica de la estructura interna de la materia y el comportamiento de la misma. En semejante laboratorio se producen las colisiones más energéticas entre partículas subatómicas. Este acelerador lanza protones contra protones, a las mayores energías que puede obtener el hombre. Entre el astronómico número de choques que allí se producen emerge una misteriosa y novedosa forma de materia, cuya vida dura una billonésima de segundo, lo que no empece que pueda ser reconocida en dos poderosos detectores de partículas, el ATLAS y el CMS.

El descubrimiento de la partícula de Dios, según acuñara el nóbel de física Leon Lederman, ha supuesto un hito para los físicos de partículas. Desde 1995 no se había identificado una nueva partícula fundamental. Los resultados midieron la masa del bosón de Higgs en unos 125 gigaelectronvolts (GeV), unas 133 veces la masa del protón. Predicho hace unos 50 años, el bosón de Higgs y su campo correspondiente constituyen las últimas piezas de una de las teorías de mayor éxito de la historia de la ciencia, el modelo estándar de partículas y fuerzas. Si no existiera, toda la teoría debería replantearse. El modelo estándar comprende todas las partículas fundamentales de la naturaleza, 17 con el bosón, y todas las fuerzas de la naturaleza, a excepción de la gravedad.

El modelo estándar de la física de partículas es una teoría cuántica de campos. Se centra, pues, en ondas o campos cuánticos que describen la probabilidad de hallar partículas aquí o allí. Las partículas interaccionan a través de tres fuerzas: la electromagnética, que mantiene unido el átomo; la nuclear fuerte, que enlaza quarks para formar protones y neutrones, y la nuclear débil, que produce un tipo de radiactividad. Las fuerzas vienen mediadas por bosones de aforo. Existe una notable diferencia entre campos de materia (electrones, muones, quarks, etcétera) y mediadores de las fuerzas (bosones). Las partículas de materia se denominan fermiones, en homenaje a Enrico Fermi. No puede haber dos fermiones en un mismo estado cuántico. Los bosones, cuyo nombre honra la figura de Satyendra Nath Bose, pueden apilarse en un mismo estado cuántico. El bosón de Higgs nació en respuesta a una cuestión que parecía harto abstrusa: ¿por qué el rango de la fuerza electromagnética se extiende indefinidamente, mientras que el de la fuerza nuclear débil abarca solo el núcleo atómico?

Aunque la expresión «bosón de Higgs» cuajó, con mayor fidelidad histórica debería hablarse de mecanismo de Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble. La física subyacente al bosón de Higgs fue avanzada en agosto de 1964 por François Englert y Robert Brout, de la Universidad Libre de Bruselas. Meses más tarde, de forma independiente, convergió Peter Higgs, de la Universidad de Edimburgo. Avanzaron el modelo de un universo que se hallaría lleno de un campo invisible, una suerte de líquido transparente y ligeramente viscoso; la interacción de las partículas con este campo produciría una resistencia a su movimiento, el efecto de una masa. ¿Por qué porta el nombre de Higgs? Unas citas equivocadas pueden tener parte de la culpa. Aunque Benjamín Lee utilizó la expresión «bosón de Higgs» en 1966, lo que parece que le dio respaldo y autoridad fue un artículo publicado por Steven Weinberg de 1967, donde erró en la prioridad. En 2012 Weinberg reconoció que se había equivocado. Siguiendo las ideas en un comienzo un tanto generales del mecanismo de Englert-Brout-Higgs-Guralnik-Hagen-Kibble, Steven Weinberg las ensambló y mostró con precisión de qué modo una partícula encajaba en el esquema general de la naturaleza, que conjuga las interacciones débiles con las interacciones electromagnéticas para configurar lo que denominamos modelo estándar.

Los físicos teóricos cayeron en la cuenta de que podían conjugar la fuerza electromagnética y la fuerza débil y dar cuenta de la diferencia de sus rangos. Partieron del supuesto siguiente: así como la fuerza electromagnética viene mediada por fotones, partículas cuánticas, la fuerza débil viene mediada por el bosón W y el bosón Z. Pero mientras el fotón carece de masa, los bosones W y Z portarían masa, la cual estrecharía el rango de actuación de los mismos. Ahora bien, si los teóricos asignaban masa solo a los bosones W y Z, la teoría resultaba un fiasco matemático. Las masas de W y Z deberían proceder de las interacciones entre las propias partículas carentes de masa. Y ahí es donde entraba el bosón de Higgs. Los bosones W y Z fueron descubiertos, con las propiedades predichas, en experimentos acometidos en el CERN en 1983.

El LHC, de trazado circular, provoca con sus 27 kilómetros de longitud el choque de protones a una energía que cuadruplica la obtenida hasta ahora por cualquier otra máquina. Los choques se producen en dos detectores, el ATLAS y el CMS, que se habían aprestado a la caza del Higgs desde que el LHC comenzó a tomar datos. Todos los bosones creados en los choques deben desintegrarse en partículas conocidas; el bosón de Higgs lo hace, entre otras, en dos fotones. A partir de la energía

de los fotones, los físicos experimentales pueden inferir la masa de la partícula progenitora. Los físicos de CMS y ATLAS han analizado todos los choques protón-protón en los que se han producido dos fotones energéticos. El siguiente paso consiste en medir la energía y direccionalidad de cada par de fotones. Con esos datos puede obtenerse su «masa invariante»; es decir, la energía de los fotones según la mediría un observador imaginario que viajara montado en el centro de masas del sistema formado por los dos fotones.

El libro de Lederman y Hill es, además, una vindicación de la ciencia básica y un alegato contra la política cicatera que mira solo los costes inmediatos sin atender el rendimiento a medio plazo. Y recuerda que, en 1989, un joven informático, Tim Berners-Lee, escribió una propuesta sobre un sistema de información distribuida. Pensada para los físicos de partículas, la red ideada trascendió esos límites, fijados en 1991. En 1993 comenzaba extenderse a otros ámbitos. La Telaraña Mundial (World Wide Web) fue en efecto una consecuencia directa de investigación básica en física de partículas. Ese mismo año de 1993, el Congreso de los Estados Unidos cancelaba el proyecto del nonato Supercolisionador Superconductor. Esa cancelación privó a los Estados Unidos de la posibilidad de descubrir la partícula de Dios.

Afortunadamente para los científicos estadounidenses al menos, EE.UU. participó en la construcción del LHC. La física de partículas se ha desarrollado hasta el extremo de convertirse en una actividad internacional. Ningún acelerador de partículas podría construirse sin una plena colaboración internacional. Incluso la utilización del Tevatrón del Fermilab, el principal acelerador de partículas durante los dos decenios anteriores a la puesta en marcha del LHC, fue una empresa internacional.

A finales de la Segunda Guerra Mundial, la ciencia europea había perdido su papel rector y cedió el testigo a los Estados Unidos. Pero Niels Bohr y Louis de Broglie, entre otros, siguieron apostando por la física europea. En 1957, el CERN construyó su primer acelerador de partículas, una máquina de potencia discreta que suministraba haces de partículas para los primeros experimentos. En 1959, el sincrotrón inicial se sustituyó por una máquina más potente, el sincrotrón de protones (PS). El primer colisionador protón-protón del mundo, el ISR, se construyó allí en 1971. La máquina produjo las primeras colisiones frontales protón-protón. Por aquel entonces, en California se avanzaba en el primer colisionador electrón-positrón en el laboratorio del colisionador lineal de Stanford.

A comienzos de los años setenta se habían conjuntado todos los datos disponibles que se habían venido recogiendo a lo largo de un siglo, principalmente los producidos en los aceleradores de altas energías. Los físicos habían desarrollado una teoría descriptiva y predictiva potente, que terminó por denominarse modelo estándar y unió dos de las fuerzas conocidas en una entidad unificada. Esas dos fuerzas son electromagnetismo (fuerza asociada con el magnetismo, la luz y la electricidad) y una fuerza débil, tan débil que ni siquiera se identificó hasta los noventa del siglo XIX, la denominada interacción débil. Aunque débil, sin esta última fuerza ni el Sol podría brillar, ni nosotros existir.

El modelo estándar predecía que la fuerza débil debía ir asociada a tres partículas, todavía por observar: los bosones W^+, W^- y Z^0. Con la peculiaridad de que las partículas W^+ y W^- multiplicarían por 80 el peso del protón; por 90 lo haría el bosón Z^0. Su vida media sería brevísima, casi instantánea. Ante los sólidos indicios indirectos de su existencia, se impulsó la construcción de una máquina capaz de producir directamente y observar los bosones W^+, W^- y Z^0.

A comienzos de los setenta entró en funcionamiento el principal gran acelerador del Fermilab (el Anillo Principal). Por su parte, el CERN había construido, sobre el preexistente PS, el Super Sincrotrón de Protones (SPS). Ambos, el Anillo Principal (del Fermilab) y el SPS (del CERN) alcanzaban varios kilómetros de perímetro. La física de partículas se había convertido en gran ciencia. A finales del decenio de los setenta, el Fermilab se embarcó en un proyecto a largo plazo de construcción del Tevatrón, una máquina que provocaría el choque entre protones y antiprotones y que con el tiempo habría de convertirse en el primer colisionador superconductor. Por su parte, el CERN tomó la decisión de convertir el SPS en un colisionador protón-antiprotón para cazar los bosones débiles W^+, W^- y Z^0.

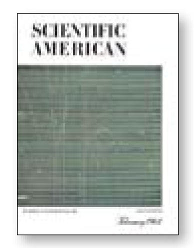
En el CERN, las primeras colisiones en el SPS se consiguieron a los dos años de la aprobación del proyecto. Dos grandes experimentos del SPS, el UA1 y el UA2, comenzaron a rebuscar, entre los escombros de las colisiones, signos de partículas de interacción débil; en 1993 el CERN anunció el descubrimiento de los bosones W^+, W^- y Z^0. Carlo Rubia y Simon van der Meer, dos científicos clave de ese descubrimiento y decisivos también en la conversión del SPS en un colisionador, recibieron el Nobel de física ese año.

El Tevatrón del Fermilab comenzó a funcionar más tarde. Debe advertirse que, en el transcurso de ese período, el presupuesto del Fermilab (en dólares de hoy) era de 300 millones, mientras que el presupuesto del CERN superaba de largo los mil millones de dólares. El dinero quizá no compre la felicidad, pero sí compra ciencia punta y lo hace con rapidez y eficacia. Aunque adelantado el Tevatrón por el CERN en el descubrimiento de los bosones W^+, W^- y Z^0, la colaboración de dos experimentos, el D-Zero y el CDF, descubrieron el esquivo quark cima (*top*), la más pesada de todas las partículas conocidas del modelo estándar, a mediados de los noventa.

¿Qué vendrá después del LHC? Los aceleradores circulares de haces de electrones a ultraaltas energías deben solventar el problema de la importante pérdida de energía debida a la radiación de sincrotrón. Estos días se habla de alcanzar una colaboración mundial para la creación en Japón de un Colisionador Lineal Internacional (ILC). El sistema ILC presenta un límite energético superior de 1 TeV. Para crear el bosón de Higgs necesitamos el choque frontal entre un electrón y un antielectrón (positrón) a una energía total de unos 245 gigaelectronvoltios (GeV). Ese proceso de producción crea un bosón con una masa de 125 GeV más un bosón Z^0 con una masa de 90 GeV. Necesitaríamos otros 30 GeV para maximizar el proceso. Otra posibilidad podría ser construir una gran factoría Higgs circular de electrones-positrones. O construir un LHC de muy alta energía, un VLHC. Cabe también la opción de construir un colisionador de muones. El proyecto X constituirá la pieza central del futuro del Fermilab y el programa estadounidense de Físicas de Altas Energías. El proyecto X es un acelerador de protones de alta intensidad. (Se llama X porque de momento no ha encontrado un nombre mejor.) El proyecto X constituye un objetivo tecnológico ambicioso: la construcción de un acelerador de protones de unos 5 megavatios con una energía de 3-8 GeV por protón; permitirá escudriñar las profundidades de la materia como jamás se ha hecho en física de altas energías.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Febrero 1964

Los riesgos del tabaco

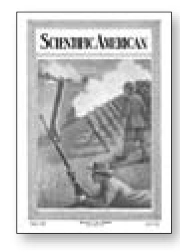
«El consumo de cigarrillos guarda una relación causal con el cáncer de pulmón de los hombres; la magnitud de su efecto supera con creces al de los demás factores. Tal es la tajante afirmación del informe publicado el 11 de enero por el Servicio de Salud Pública de EE.UU. Los primeros estudios estadísticos a gran escala sobre el efecto nocivo de los cigarrillos se publicaron en 1954. En los nueve años transcurridos desde entonces, más de 300.000 estadounidenses han fallecido a causa de cáncer de pulmón. Durante ese tiempo la industria tabaquera ha seguido confiando en un único argumento: una asociación estadística entre el consumo de cigarrillos y la enfermedad no demuestra una relación causal.»

Los peligros del cine

«Se podría afirmar que la contemplación de la agresión contribuye más a las conductas hostiles que a mitigarlas; de hecho, la violencia en el cine o en la televisión puede estimular acciones agresivas tanto entre las personas normales como entre quienes sufren trastornos emocionales. Añadiría una salvedad importante: esos actos entre personas normales solo se dan bajo ciertas circunstancias. Los resultados de los experimentos revelan algunas de las situaciones que podrían provocar conductas agresivas entre personas de un público que haya presenciado violencia filmada

—Leonard Berkowitz».

Berkowitz es profesor emérito de psicología en la Universidad de Wisconsin-Madison.



Febrero 1914

La existencia del éter

«La idea de la existencia de un medio universal, que llene todo el espacio, ha sufrido muchas vicisitudes. En el momento actual hay al menos tres teorías: una considera al éter como un fluido incompresible, muy rígido y denso; otra lo considera compuesto de partículas mucho más pequeñas que el electrón; y la tercera niega por completo su existencia y pretende erradicarlo de la lista de teorías físicas. Esta última gana más adeptos cada día. Y, una vez más, vemos reaparecer la idea misteriosa y un tanto aterradora de la nada absoluta que reina en el espacio ultraterrestre, la cual habíamos creído felizmente anulada con la introducción del éter.»

Acero

«Quien escribe tuvo ocasión de visitar hace poco las instalaciones de la Compañía de Acero de Illinois en el Sur de Chicago y quedó impresionado por el ambiente de "ante todo la seguridad" que impregna toda la fábrica. Hay avisos de seguridad en cinco idiomas en todos los puntos donde cabe la posibilidad de un accidente. Y no solo eso, sino que los mismos trabajadores parecen imbuidos por el espíritu de la seguridad y apoyan con entusiasmo los procedimientos. Nuestra ilustración muestra un gran cucharón de colada cargado con 50 toneladas de metal fundido.»



ACERO EN LA ERA DE LAS MÁQUINAS: Cucharón de colada con 50 toneladas de arrabio, 1914.



Febrero 1864

Sistema métrico y política

«El conservadurismo político británico (los *tories*) se ha alzado en armas ante la propuesta de introducir en Inglaterra el sistema decimal de pesos y medidas. La idea, encarecidamente recomendada a la consideración general de la Cristiandad en el reciente Congreso Nacional de Berlín, en el cual el honorable S. B. Ruggles [de la Cámara de Comercio de la Ciudad de Nueva York] representaba a Estados Unidos, ha sido expuesta en la Cámara de los Comunes por el señor William Eward. El semanario londinense *John Bull*, órgano periodístico *tory*, la denuncia como "absurda e insolente" y como "una idea que solo puede entrar en la cabeza de zopencos, liberales (los *whigs*) y tiranos revolucionarios».

EE.UU. y las unidades de medida

«Sres. de la redacción: Al leer una descripción del sistema métrico francés se me ocurren las siguientes reflexiones. El tiempo y el dinero empleados en difundir y mantener nuestro caótico sistema bastarían para dar una educación universitaria a toda la población. —J. Edi»

Susurros desde las viñas

«La máxima novedad son las pasas de California. Igualan a las mejores de las importadas y cuestan menos. Pocas de ellas han aparecido en los estados atlánticos, pero al cabo del tiempo expulsarán del mercado a los frutos extranjeros.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CX, N.º 6, 7 DE FEBRERO DE 1914

PSICOLOGÍA

La mente inconsciente

John A. Bargh

Impulsos y deseos inconscientes impelen nuestro pensamiento en formas que Freud no imaginaba.



FÍSICA DE PARTÍCULAS

El mayor generador de rayos X

Nora Berrah y Philip H. Bucksbaum

En el Acelerador Lineal para Fuente de Luz Coherente de Stanford se han creado extraños estados de la materia que no se encuentran en ningún otro lugar del universo.





BIOINGENIERÍA

Simulación de una célula viva

Markus W. Covert

Al crear el primer modelo informático de un organismo unicelular, los biólogos están desarrollando una nueva y potente herramienta para descifrar el funcionamiento de la vida.

ENERGÍA

El prolongado y lento ascenso de la energía eólica y solar

Vaclav Smil

La gran esperanza de una transición rápida y radical a las energías renovables es una ilusión.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Barcelona
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14 - 08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

Madrid
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Adrados: *Los metamateriales se acercan al mercado* y *Materiales virtuales*; Javier Grande: *La próxima Supernova en la Vía Láctea*, *El árabe en la astronomía*; Andrés Martínez: *La batalla evolutiva acústica*, *Orígenes de la complejidad biológica* y *Apuntes*; Luis Bou: *Foro científico* y *Por qué el cerebro prefiere el papel*; José Manuel Vidal Donet: *Los beneficios del ejercicio*; Xavier Roqué: *Historia de la ciencia*; Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Pere Molera: *Taller y laboratorio*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España